

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

Retardo en redes LEO: modelado y análisis
(Delay over LEO networks: modeling and analysis)

Para acceder al Título de

Graduado en
Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación

Autor: Fátima Khan Blanco

Septiembre- 2021



E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO

Realizado por: Fátima Khan Blanco

Director del TFG: Luis Francisco Díez Fernández, Ramón Agüero Calvo

Título: “Retardo en redes LEO: modelado y análisis”

Title: “Delay over LEO networks: modeling and analysis”

Presentado a examen el día: 21-09-2021

para acceder al Título de

GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

Composición del tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Cobo García, Adolfo

Secretario (Apellidos, Nombre): Agüero Calvo, Ramon

Vocal (Apellidos, Nombre): Sanz Gil, Roberto

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del TFG
(solo si es distinto del Secretario)

Vº Bº del Subdirector

Trabajo Fin de Grado Nº
(a asignar por Secretaría)

Resumen

A lo largo de los años las tecnologías han evolucionado, hasta tal punto en que las redes convencionales y satelitales, que han estado siempre presentes, van a cohesionar, con el fin de proporcionar especialmente cobertura desde cualquier punto, sin importar la localización y, así, cubrir la creciente demanda, siendo relevante el incremento del IoT.

Entre las diferentes órbitas, este proyecto se centra en el estudio de las comunicaciones satelitales LEO. Una de sus principales ventajas, es la baja latencia, al tratarse de la órbita más cercana a la Tierra. Otra de sus características, es la conexión continua, garantizada por estar en movimiento con relación a la Tierra.

A lo largo de este trabajo, se expondrá el modelado del canal tierra-satélite, incluyéndose también enlaces inter-satelitales. Su estudio se realiza mediante un simulador por eventos desarrollado por el Grupo de Ingeniería Telemática. Posteriormente se realizará un análisis estadístico de los resultados, con el fin de estimar el comportamiento de la red en supuestos realistas.

Palabras clave: LEO, 5G NR, Redes de Jackson.

Abstract

Technology has evolved rapidly over a relatively short period of time, to such extent that conventional networks and Non-Terrestrial Networks, which have always been there, are being jointly considered to provide coverage from anywhere, regardless the location, and to meet the increasing demand, being particularly relevant the looming of IoT communications.

Between existing satellite orbits, this project focuses on LEO communications. One of their key advantages is the low latency, due to the shorter distance to the Earth. Another key feature is the “always-on” connectivity, which is ensured by the continuous movement with respect to the Earth.

In this BSc Thesis, we have thoroughly studied the performance of the satellite-to-ground channel, as well as the subsequent inter satellite links. The analysis will be carried out by an event-driver simulator, developed by the Grupo de Ingeniería Telemática. We will extensively analysis the statistics of the obtained results, in order to shed light on the network performance for different realistic scenarios.

Keywords: LEO, 5G NR, Jackson networks.

Índice general

Índice general	V
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	IX
Índice de acrónimos	XI
1 Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Objetivos	2
1.3. Contribuciones	2
1.4. Estructura de la memoria	3
2 Antecedentes	5
2.1. Estado del arte	5
2.2. Las redes no terrestres y el 5G	7
2.2.1. Alturas orbitales y características	8
2.2.2. Arquitectura de las redes no terrestres	9
2.2.3. Banda de frecuencia	10
2.2.4. Escenarios	11
2.3. Fundamentos teóricos	13
2.3.1. Terminología básica	13
2.3.2. Modelado del canal Land Mobile Satellite	14
2.3.3. Teorema de Jackson	16
2.3.4. Conceptos teóricos sobre las medidas	18
3 Desarrollo y metodología	21
3.1. Herramientas utilizadas	21
3.1.1. Simulador de eventos	21
3.1.2. Python	22
3.1.3. MATLAB	22

3.2. Metodología	22
3.2.1. Distribuciones de los eventos de salidas	23
3.2.2. Coeficiente de dispersión del tiempo entre salidas.	25
4 Resultados	27
4.1. Caracterización del tráfico de salida del nodo LMS	27
4.1.1. Tiempo entre salidas	28
4.1.2. Distribución del tráfico a la salida del nodo LMS	32
4.1.3. Coeficiente de dispersión	34
4.2. Red conformada por un nodo LMS y nodos M/M/1	37
4.2.1. Coeficiente de dispersión	37
5 Conclusiones y líneas futuras	41
5.1. Conclusiones	41
5.2. Líneas futuras	42
Bibliografía	43

Índice de figuras

2.1. Funcionalidades de las redes no terrestres [3].	7
2.2. Alturas orbitales.	8
2.3. Arquitectura de la red.	9
2.4. Bandas de frecuencias.	10
2.5. Caso genérico de una cola.	13
2.6. Notación de Kendall.	14
2.7. Modelo de la cadena de Markov para el enlace ascendente y descendente.	15
2.8. Cadena de Markov para los enlaces UP/DL.	16
2.9. Cadena de Markov UP/DL.	18
2.10. Llegada X_1 a un sistema tras un intervalo T.	19
2.11. Tiempo entre llegadas sin memoria.	19
3.1. Eventos de salida del nodo que modela el canal ascendente y descendente.	23
3.2. Procedimiento para obtener las distribución del tiempo entre salidas y la distribución del proceso.	23
3.3. Proceso para obtener la distribución de los eventos de salida de un nodo.	24
3.4. Procedimiento de obtención de resultados.	25
4.1. Tiempo entre salidas para buffer infinito.	29
4.2. Tiempo entre salidas para buffer finito 7.	30
4.3. Tiempo entre salidas para buffer finito 15.	31
4.4. Distribución del tráfico en la salida para buffer infinito.	32
4.5. Distribución del tráfico en la salida para buffer finito $b = 7$	33
4.6. Distribución del tráfico en la salida para buffer finito $b = 15$	34
4.7. Coeficiente de dispersión del tiempo entre salidas sobre $\lambda \text{ ms}^{-1}$	35
4.8. Coeficiente de dispersión del tiempo entre salidas frente a la tasa de llegadas $\lambda \text{ ms}^{-1}$ para buffer finito $b = \{7, 15\}$	36
4.9. Coeficiente de dispersión para buffer infinito y tasa $\mu_{ds} = 1 \text{ ms}^{-1}$	38
4.10. Coeficiente de dispersión para buffer infinito y tasa $\mu_{ds} = 0 \text{ ms}^{-1}$	38
4.11. Coeficiente de dispersión para buffer finito, $b = 7$ y $\mu_{ds} = 1 \text{ pkts/ms}$	39
4.12. Coeficiente de dispersión para buffer finito, $b = 7$ y $\mu_{ds} = 0 \text{ pkts/ms}$	39
4.13. Coeficiente de dispersión para buffer finito, $b = 15$ y $\mu_{ds} = 1 \text{ pkts/ms}$	39

4.14. Coeficiente de dispersión para buffer finito, $b = 15$ y $\mu_{ds} = 0 \text{ pkts/ms}$	40
---	----

Índice de tablas

2.1. Características de la banda S.	11
2.2. Características de la banda Ka.	11
2.3. Escenarios de implementación NTN con sus correspondientes características.	12
2.4. Características específicas de los datos de la banda S.	13
4.1. Parámetros del enlace LMS en la banda S.	27
4.2. Capacidades del enlace LMS en la banda S.	28
4.3. Escenarios analizados.	28
4.4. Tabla con las λ_{max} respectivas a la tasa de Ds	29
4.5. Características de los escenarios para una red satelital.	37
4.6. Escenarios implementados hasta la tasa que garantiza la estabilidad del sistema.	37
4.7. Escenarios implementados con la correspondiente tasa máxima para buffer $b = \{7, 15\}$	38

Índice de acrónimos

Números | A | D | E | F | G | H | I | J | L | M | N | Q | R | S | T | U

Números

1G First-Generation.

2G Second-Generation.

3G Third-Generation.

3GPP Third Generation Partnership Project.

4G Fourth-Generation.

5G Fifth-Generation.

5G NR 5G New Radio.

A

AoI Age of Information.

ARQ Automatic Repeat Request.

D

DS Deep-Shadowing.

DTNs Delay-Tolerant Networks.

E

eMBB Enhanced Mobile Broad Band.

ESA European Space Agency.

F

FDD Frequency Division Duplex.

FIFO First In, First Out.

FR1 Frequency Range 1.

FR2 Frequency Range 2.

G

GEO Geostationary Earth Orbit.

GIT Grupo de Ingeniería Telemática.

gNB next generation-NodeB.

GS Ground Station.

GSM Global System for Mobile communications.

H

HAPS High Altitude Pseudo-Satellite.

I

IoT Internet of Things.

ISLs Inter-Satellite Links.

ISM Industrial, Scientific, Medical.

ITU International Telecommunication Union.

J

JSON JavaScript Object Notation.

L

LEO Low Earth Orbit.

LMS Land Mobile Satellite.

LoS Line of Sight.

LTE Long Term Evolution.

M

MEO Medium Earth Orbit.

mMTC Massive Machine Type Communications.

MNO Mobile Network Operator.

MS Mid-Shadowing.

MSS Mobile Satellite Service.

N

NFV Network Function Virtualization.

NGSO Non-GEO.

NR New Radio.

NTN Non-Terrestrial Network.

Q

QBD Quasi-Birth-Death.

QoS Quality of Service.

QSDR Queue State-based Dynamic Routing.

R

RAN Radio Access Network.

RSD Relative Standard Deviation.

S

SDL Supplemental Downlink.

SDN Software-defined Networking.

SDSN Software Defined Satellite Networks.

SNO Satellite Networks Operator.

SUL Supplemental Uplink.

T

TCP Transmission Control Protocol.

TDD Time Division Duplex.

U

UAS Unmanned Aerial System.

uRLLC Ultra Reliable and Low Latency Communications.

Introducción

El futuro de las telecomunicaciones se prevé revolucionario. Por ende las tecnologías de comunicación y redes están evolucionando a un ritmo vertiginoso, dando lugar al auge protagonizado por el 5G New Radio (5G NR) de Third Generation Partnership Project (3GPP) y el incremento exponencial de los dispositivos que conforman Internet of Things (IoT), como consecuencia de su baja latencia.

En otro orden de ideas, para un mejor entendimiento de la importancia que va tener el papel del 5G NR, se va hacer un retroceso al pasado, con el fin de recordar cada uno de los estándares fundamentales de las comunicaciones inalámbricas y ver su participación en el contexto actual. Desde el First-Generation (1G), donde solo se prestaba servicio de voz y cuya tecnología era analógica, pasando por el Second-Generation (2G), estándar Global System for Mobile communications (GSM), el cual introduce la conmutación de funciones centralizadas y la jerarquización Radio Access Network (RAN), siendo además una de las transiciones más importantes en las redes inalámbricas, trascendiendo del mundo analógico al digital. En la Third-Generation (3G) se reduce la jerarquización y prevalece un tipo de red más distribuida, donde los elementos RAN se hicieron más frecuentes, reduciendo de esta manera la brecha de la información y, en concordancia, el apogeo de los servicios basados en datos. Finalmente, el Fourth-Generation (4G) / Long Term Evolution (LTE) actualmente proporciona una arquitectura centralizada alrededor de 3GPP/LTE y sobre componentes RAN [1]. En este breve transcurso del tiempo, junto con las tecnologías de comunicación, los satélites han ido aumentando la inclusión en el mercado desde la aparición de la segunda generación.

No obstante, como en la mayoría de los contextos, surge una serie de desventajas, a las cuales hay que buscar una solución óptima. Dichas tecnologías no colman en su totalidad todas las áreas de cobertura posible, correspondiéndose a este hecho una tasa de penetración del 51 % [2]; excluida de dichas virtudes la mitad de la población, haciendo hincapié en aquellos lugares remotos a los cuales hay que añadirles la elevada dificultad para su acceso. Se incluye transportes de alta velocidad o aéreos cuya Quality of Service (QoS) es extremadamente baja, pues el uso de redes inalámbricas tradicionales no los cubre de manera satisfactoria. Siendo la falta de QoS ocasionada por el elevado traspaso de frecuencias entre celdas y la tasa de llamadas caídas, esto se convierte en un punto de mira para las nuevas generaciones de satélites que frente las anteriores poseen la ventaja de conformar topologías de red.

En paralelo, a lo largo de los años se ha perseguido el objetivo de que las comunicaciones satelitales convivan con los estándares y tecnologías predominantes, mediante el énfasis en el backend [3]. En cambio,

Fifth-Generation (5G) propone un giro drástico de dicho planteamiento, defendiendo una arquitectura en la cual pueda adherirse todas las tecnologías de acceso, y donde la red satelital que siempre ha estado presente cambiara su rol, siendo necesario su desarrollo para interoperar dentro de la arquitectura, donde van a tener presencia tecnologías como Software-defined Networking (SDN), Network Function Virtualization (NFV) y la orquestación de servicios. Resulta de esta implicación un espectro más amplio de servicios, donde el satélite será la tecnología de acceso con un papel fundamental, pues permitirá aprovechar las ventajas inherentes del satélite (funcionalidad de multidifusión / transmisión) para nuevos casos de uso, mientras se preserva espectro inalámbrico de alto valor para los servicios sensibles a la latencia, y resolviendo la problemática del acceso a áreas remotas, motivado por el elevado coste que supondría a la hora de proporcionar servicios de telecomunicación a esas zonas de manera convencional.

1.1. Planteamiento del problema

En trabajos previos de investigación se ha planteado el análisis del retardo asumiendo condiciones ideales en redes satelitales Low Earth Orbit (LEO), siendo estos fundamentales en el despliegue del 5G NR. Es por ello que en presencia de la problemática de los desvanecimientos causados ante la aparición de propagación por trayectos múltiples, debido a obstáculos e irregularidades, o bien la ausencia de Line of Sight (LoS), se considere un nuevo modelo más realista. El modelo está basado en un proceso Quasi-Birth-Death (QBD), y evalúa el retardo en cola de los enlaces Land Mobile Satellite (LMS), para los diferentes estados entre el satélite y la estación terrestre o viceversa, a través de una cadena de Markov que valora los diferentes estados del canal.

1.2. Objetivos

El objetivo principal del trabajo es profundizar en el análisis del retardo en redes de satélites LEO. Se parte de un modelo que permite estudiar el comportamiento de los enlaces tierra-aire LMS, utilizando teoría de colas, y se incluirán los diferentes enlaces inter-satelitales Inter-Satellite Links (ISLs) como nodos M/M/1, formando una topología de red en cadena.

Se utilizará un simulador por eventos desarrollado por el Grupo de Ingeniería Telemática (GIT) y se estudiarán estadísticamente los procesos de salidas de cada uno de los nodos, para analizar las condiciones en las cuales sería posible utilizar modelos analíticos (redes de Jackson abiertas) con el fin de estimar el comportamiento de la red.

Se utilizarán supuestos realistas, en cuanto a la limitación de la longitud de los buffer en los diferentes nodos de la red o a la existencia de desconexiones debido a la presencia de situaciones de desvanecimientos profundos de la señal en el enlace LMS.

1.3. Contribuciones

Este trabajo realiza una serie de aportaciones que se resumen a continuación:

- En primer lugar, como novedad se limita el buffer sobre el subsistema que modela el enlace tierra-aire, observando el impacto sobre el escenario a simular.

- En segundo lugar, se realiza un barrido de la tasa de servicio, hasta llegar a un valor nulo en situaciones de desvanecimientos profundos.
- Con una serie de escenarios relevantes, se pretende caracterizar el proceso en la salida del nodo LMS.
- También se analiza lo que ocurre cuando las condiciones de los escenarios no se atienen a las premisas de la teoría clásica de colas.
- Analizar el sistema cuando no se cumplen las características de las redes de Jackson.

1.4. Estructura de la memoria

A continuación se detalla la estructura del documento, examinando brevemente el contenido de cada uno de los capítulos.

- En el Capítulo 2, se realiza un recorrido sobre las investigaciones previas a este trabajo. También se hace referencia a las tecnologías del 5G sobre las que se sustenta, desde el punto de vista funcional, orbital y escenarios. Finalmente, se introducen ciertos aspectos relevantes referentes al marco teórico, como el teletráfico, redes de sistemas de cola y la cadena de Markov con la que se ha trabajado.
- En el Capítulo 3, se mencionarán las herramientas empleadas y su funcionalidad o aportación en el desarrollo del proyecto. Por otra parte, se abordarán los detalles de cómo se han obtenido los resultados de manera experimental, así como la metodología que se ha llevado a cabo para obtener los mismos.
- El Capítulo 4 supone la pieza central del trabajo, ya que se realiza un análisis exhaustivo de los resultados obtenidos previamente sobre el escenario indicado. En él, se tratarán aspectos sobre las funciones de densidad del tiempo entre salidas, el coeficiente de dispersión y el proceso de salida del nodo LMS, dichos parámetros permitirán caracterizar el tráfico en la salida. Además, observaremos cómo evoluciona el tráfico al atravesar una serie de nodos $M/M/1$, los cuales conforman enlaces ISLs, de esta manera podremos ver si la red cumple los postulados de las redes de Jackson abiertas.
- Por último, en el Capítulo 5 se expondrán las conclusiones finales tras el análisis de todas las medidas obtenidas, así como los principales hallazgos obtenidos. Además, se expondrán las líneas futuras que surgen a partir de este trabajo.

Antecedentes

Con el objetivo de contextualizar el marco de la investigación donde se encuentra este trabajo, en el presente capítulo se narran las investigaciones previas de forma concisa, de tal modo que se comprenda mejor las motivaciones del mismo. A continuación, se tratarán aspectos teóricos en los que se apoya el trabajo, de tal forma que el lector asimile los conceptos tratados a lo largo del proyecto.

2.1. Estado del arte

Las investigaciones que preceden al trabajo actual se caracterizan mayoritariamente por centrarse en el análisis convencional mediante tasas fijas generalmente ideales, por ello no engloba los efectos de canales satelitales realistas que varían en el tiempo.

El análisis del retardo en las colas de espera de las redes satelitales LEO se ha considerado anteriormente para diferentes propósitos. Entre ellos, en el trabajo [4] se ha empleado una cadena de Markov con el objetivo de estudiar la cola de almacenamiento de un solo satélite con capacidad de enlace descendente / ascendente, a bordo y un proceso de repetición selectiva Automatic Repeat Request (ARQ) para la corrección de errores, haciendo hincapié en el análisis del retardo y considerando el impacto de diferentes longitudes de buffer, asumiendo un canal ranurado en el tiempo. En el artículo [5] se propone un análisis del retardo medio de los paquetes extremo a extremo para los sistemas de satélite LEO, mediante un marco de simulación que utiliza la optimización de la capacidad y el flujo. En [6] se examina un modelo estadístico para determinar la cola y el retardo de transmisión de un paquete dentro de una red ISLs, situado el escenario en una constelación similar a Galileo mediante la aplicación de diferentes políticas de encaminamiento. El modelado da como resultado una cadena de Markov compuesta por ocho estados permitiendo observar el impacto del retardo de transmisión, además de la sobrecarga de señalización causada por traspasos. Todos estos trabajos tienen dificultad en extrapolar dichos modelos a otras casuísticas, en tanto en cuanto dependen de una topología fija con distribuciones de retardo muy específicas.

Otra investigación para el retardo de cola sobre constelaciones ópticas LEO [7], se enfoca en el cálculo del número medio de satélites entre dos estaciones en tierra, con el fin de obtener el retardo medio en cola sin tener en cuenta el impacto del buffer en ciertos escenarios, asumiendo una llegada que sigue una distribución de Poisson. El siguiente estudio [8] modela la cola en una red de satélites SDN. En él se modela el retardo en espera en redes que son flexibles, Delay-Tolerant Networks (DTNs). En consecuencia se diseña un modelo de cola para Software Defined Satellite Networks (SDSN) considerando

el mecanismo del almacenamiento y retransmisión de DTNs y el proceso de señalización de OpenFlow, debido a los tiempos de desconexión. Este estudio se realiza enfocándose únicamente en el controlador SDN, situado en la órbita geoestacionaria. No obstante, este artículo no considera la repercusión de los elementos variables del canal satelital, asumiendo una configuración idónea. Por su parte, el rendimiento del algoritmo de enrutamiento basado en SDN (SDRA) se cuantifica, en términos de retardo de cola y distancia de salto total para constelaciones LEO, en [9], donde los controladores están interconectados a través de los Ground Station (GS) en una red terrestre. Sin embargo, su modelo de cola adoptado considera canales constantes ideales mientras intenta evitar la sobrecarga de las colas de satélites.

Por último, en [10] se propone un modelo general de tiempo limitado $M / G / 1$ para representar la conectividad intermitente de ISL entre dos satélites en constelaciones de órbita LEO y Medium Earth Orbit (MEO). Su objetivo es alejarse de los métodos convencionales de modelado. Se propone una cadena de Markov compuesta por dos estados, cada uno de ellos representa una situación: actividad e inactividad. Sus tasas son fijadas en función del posicionamiento entre el transmisor y el receptor, independientemente de que nos encontremos en una comunicación entre satélites, o bien un satélite con una estación de tierra, es decir, línea de vista LoS, adicionalmente perdiendo relación con el tamaño de cola de espera. Respecto a lo anterior, toca resaltar la falta de pragmatismo. En [11] se considera un simulador de tráfico que pretende estimar el tamaño de buffer ideal para evitar el desbordamiento, atendiendo al retardo en los enlaces Geostationary Earth Orbit (GEO) o MEO para el protocolo Transmission Control Protocol (TCP), centrándose más en el efecto de la pérdida de los paquetes sobre el protocolo TCP que en las causas que subyacen. Se lleva a cabo mediante la adaptación de distribuciones realistas que consideran flujos tanto flargos como cortos, transformándose en trazas a la hora de trasladarlo al simulador, lo que permite la observación del comportamiento de las colas. Así, obtienen un tamaño de buffer óptimo.

En [12] se diseña, para las constelaciones satelitales LEO, un modelo de espera Queue State-based Dynamic Routing (QSDR), donde el buffer se basa únicamente en el número de paquetes disponibles en cola. En el estudio se pretende dar una información razonable, la cual necesita ser diseñada específicamente para los diferentes escenarios. En el artículo [13] se propuso un modelo de evaluación de la capacidad de supervivencia, basado en la utilidad de la red para diferentes modelos de cola, que cubren los sistemas de satélites LEO con recursos limitado, considerando las memorias intermedias de recepción para un número limitado de nodos de acceso, procesamiento de satélite y transmisión al siguiente nodo. Se lleva a cabo la investigación mediante cuatro escenarios, en los cuales las condiciones se asumen ideales. Mientras tanto, en [14] se asume un punto de vista más innovador, al tratar el retardo y el Age of Information (AoI) de una red de múltiples saltos, siendo este último un parámetro que captura la frescura de la información desde la perspectiva del destino en un red de comunicación. El escenario considerado comprende varios satélites interconectados entre sí, que conectan una serie de dispositivos hacia un destino, cuyo tráfico se incorpora desde un satélite inicial. Además dicho estudio considera que los nodos intermedios pueden agregar tráfico adicional a la red, así como tráfico de fondo. En [15] y en [16] los mismos autores modelan mediante nodos $M/M/1$ los casos de uso de descarga de una red celular 5G local y backhauling, donde las redes móviles cercanas no están presentes. En estos tres últimos artículos se presupone que los canales de comunicación no varían en el tiempo.

Al margen de las investigaciones que han sido citadas previamente, este trabajo emplea una cadena de Markov propuesta por el GIT en el artículo [17] con el fin de emular las comunicaciones entre las estaciones

terrestres y satelitales, recurriendo al modelo tierra-aire LMS, con detalles de vital importancia, tales como las variaciones que puede sufrir en el tiempo el canal, mientras que por otro lado la comunicación entre satélites ISLs se asume ideal. Por medio de un simulador por eventos se realizarán una serie de medidas para comprobar la veracidad del Teorema de Jackson para redes abiertas y validar su aplicación frente a los impactos de las redes satelitales LEO, observando lo bien o mal que se adapta, en cuanto al impacto del comportamiento en las distribuciones del tráfico en la salida del sistema de cola.

2.2. Las redes no terrestres y el 5G

Las redes no terrestres Non-Terrestrial Network (NTN) surgen de una alta demanda de nuevos servicios y el crecimiento exponencial de los dispositivos inteligentes. Este tipo de redes NTN van a jugar un papel importante en el 5G y las futuras generaciones, cubriendo diferentes funcionalidades. En ellas se incluye el transporte, la salud electrónica, la energía y la automoción, entre otros aspectos, como se puede observar en la Figura 2.1, ofreciendo sus beneficios sobre áreas urbanas y rurales en términos de rendimiento. Además, el empleo de dicha infraestructura es una solución atractiva en cuanto a escenarios marítimos donde un despliegue de red tradicional supone un elevado coste y un límite en cuanto a su capacidad. En definitiva, los resultados que proporcionarán las NTN se cumplen al revolucionar la infraestructura de red celular tradicional, ofreciendo una cobertura amplia, escalabilidad, continuidad del servicio y disponibilidad.

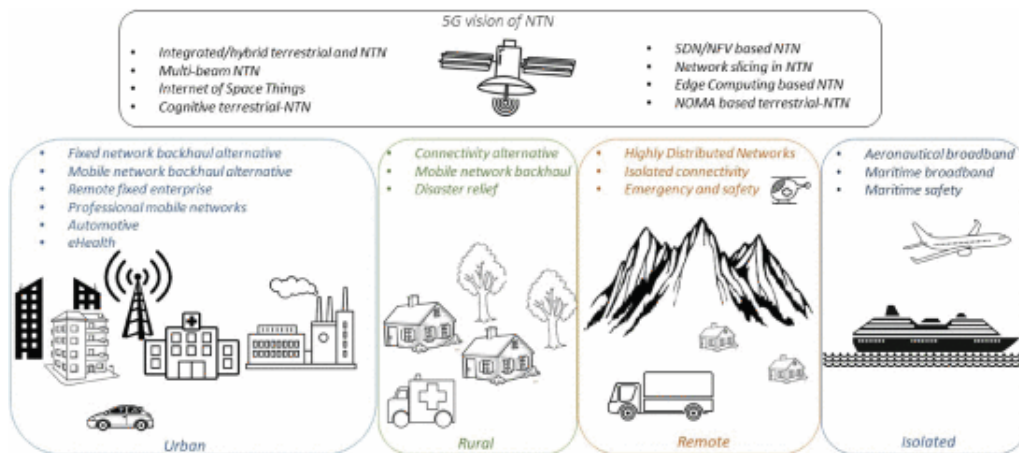


Figura 2.1: Funcionalidades de las redes no terrestres [3].

Dentro de este marco, en el 5G y las generaciones que le prosiguen, las NTN sustentarán tres tipos de escenarios definido por la International Telecommunication Union (ITU), que a su vez ofrecerán tres tipos de servicio, en primer lugar Enhanced Mobile Broad Band (eMBB), en este servicio las NTN tienen como objetivo fundamental proporcionar conectividad de banda ancha en áreas desatendidas y en plataformas móviles, así como ofrecer mayor robustez mediante la unión de los sistemas terrestres y NTN. Asimismo, también se está explotando la idea de tener un canal para entregar contenidos de transmisión y multidifusión con la finalidad de descargar la red terrestre. En segundo lugar, Massive Machine Type Communications (mMTC), NTN admite conectividad para servicios IoT de área local, y finalmente los servicios Ultra Reliable and Low Latency Communications (uRLLC). En el desarrollo de estas funciones, son primordiales los primeros casos de servicio para el desarrollo del rol de las NTN en el 5G NR, en el

caso de la funcionalidad uRLLC, se trata de una tarea compleja debido a los retrasos en la propagación satelital y los estrictos requisitos de fiabilidad, disponibilidad y latencia.

Los casos de uso de las redes satelitales se pueden clasificar en tres categorías, según su principal funcionalidad, siendo estas la continuidad del servicio para proporcionar acceso NTN cuando no sea posible mediante las redes convencionales, la ubicuidad del servicio para garantizar que siempre esté disponible en caso fallar la red convencional y finalmente, la estabilidad del servicio, cuyo objetivo es descargar el tráfico de la red convencional en las horas de mayor demanda[3].

2.2.1. Alturas orbitales y características

Una NTN, red no terrestre, se puede clasificar dependiendo de donde esté ubicada el conjunto de elementos que la componen, es decir en el espacio, dependiendo de la órbita GEO, MEO, LEO, o bien en el aire, como los drones Unmanned Aerial System (UAS) como se puede observar en la Figura 2.2a y 2.2b.

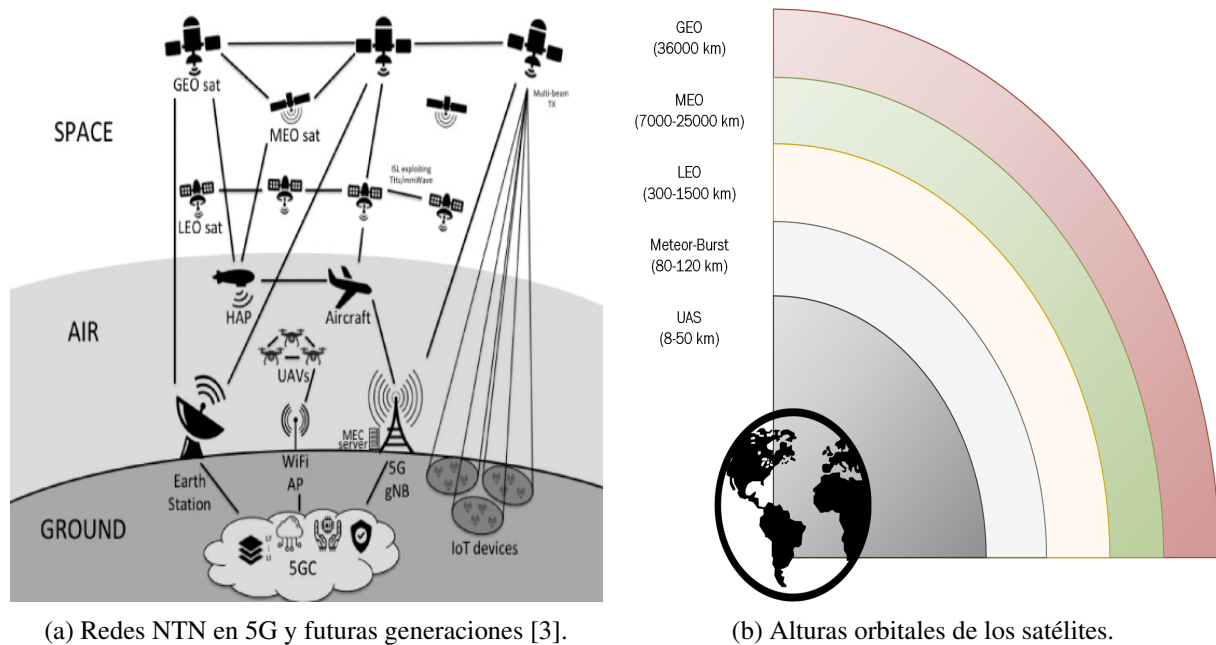


Figura 2.2: Alturas orbitales.

Por su parte, las plataformas NTN dependen de tres parámetros principales como son la altitud, el tamaño de huella del haz y la órbita. En primer lugar, nos encontramos con las plataformas espaciales:

- Geostationary Earth Orbit GEO, órbita que se caracteriza por ser circular mayoritariamente. En este tipo de órbitas el satélite permanece siempre sobre el mismo punto del ecuador terrestre y para conseguirlo, debe ajustar su velocidad angular con la velocidad angular de la Tierra [18]. Los satélites de comunicación y los meteorológicos, entre otros, se suelen ubicar en órbitas geoestacionarias porque su posición a gran altitud permite observar una amplia superficie terrestre, y su posición fija en el cielo, permite conexiones desde estaciones terrestres sin necesidad de seguimiento. El tamaño de la huella sobre la Tierra es de 200 - 3500 km.

- Medium Earth Orbit MEO es otro tipo de órbita intermedia circular. Su altitud varía entre 7000 - 25000 km, por lo que la huella sobre la Tierra oscila entre 100 - 1000 km.
- Low Earth Orbit LEO tiene una órbita circular alrededor de la Tierra que está situada a una altitud de 300 - 1500 km. La huella sobre la tierra es de 100 - 1000 km.

LEO y MEO se conocen como Non-GEO (NGSO) debido a que su período es menor que el de la rotación de la Tierra. La clase aerotransportada abarca las plataformas de sistemas de aeronaves no tripuladas UAS, que normalmente se colocan a una altitud entre 8 y 50 km, e incluyen los sistemas de plataformas de gran altitud High Altitude Pseudo-Satellite (HAPS) concretamente 20 km. A diferencia de los NGSO, la posición de los UAS se puede mantener fija en el cielo en un punto dado del suelo al igual que se puede hacer con los satélites tipo GEO.

Claramente, como se puede observar a partir de los datos previamente mencionados, cuanto mayor es la altitud mayor es la huella del haz y la cobertura que puede proveer; sin embargo, como contrapartida un aumento en altitud se puede traducir en un incremento en el retardo o latencia; por ello, esta desventaja puede acarrear grandes problemas, dependiendo de la aplicación sobre la que se implemente.

2.2.2. Arquitectura de las redes no terrestres

Como se vio en la sección previa, los elementos que componen 5G se pueden combinar entre ellos, proporcionando de esta manera interconexión entre elementos terrestres y no terrestres, un enlace de alimentación, ISLs comunicación entre satélites y un enlace de servicio, como se puede ver en la Figura 2.3 basada en [19].

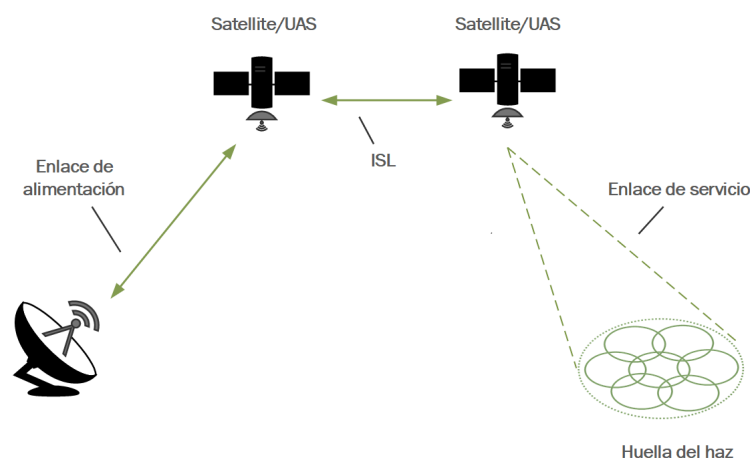


Figura 2.3: Arquitectura de la red.

Esta arquitectura ha sido ampliada por el 3GPP según de dos opciones propuestas, por lo que las plataformas espaciales y aéreas pueden pertenecer a dos configuraciones [3] diferentes que se distinguen según la carga útil transportada. Es por ello, que las plataformas NTN implementan una carga útil transparente y regenerativa. En la primera de ellas la plataforma, tanto satelital como aérea, actúa como un repetidor de radiofrecuencia analógica, tanto para los enlaces de alimentación, como para los de servicio. Es decir, se comporta como un espejo reflejando la señal recibida, transmitiendo una versión de las mismas amplificada, y tras haber realizado sobre la señal una conversión de frecuencia del enlace ascendente al

descendente. Mientras que en la configuración regenerativa, la plataforma NTN se considera la estación base en 5G next generation-NodeB (gNB).

2.2.3. Banda de frecuencia

El 5G se compone por una parte del 5G NR, que es la interfaz aérea o la tecnología de acceso por radio de la redes móviles. Las frecuencias de operación del 5G NR se han desglosado en dos grandes grupos. El primer rango de frecuencias Frequency Range 1 (FR1) incluye bandas inferiores a los 6 GHz, dentro cual se engloba aquellas frecuencias que fueron empleadas en estándares previos, mientras que el segundo rango de frecuencias Frequency Range 2 (FR2) incluye las bandas milimétricas.

Las bandas de operación son definidas en cada uno de los rangos. Las bandas situadas en el rango FR1 se caracterizan por ser de cuatro tipos; Time Division Duplex (TDD), Frequency Division Duplex (FDD), Supplemental Downlink (SDL), Supplemental Uplink (SUL), siendo estos dos últimos enlaces los que permiten un modo de envío, permitiendo que el tráfico viaje únicamente de manera descendente o ascendente. En cambio, la categoría FR2 sólo opera en TDD.

Acerca de su cobertura, la primera clase de frecuencias FR1 se distingue por cubrir un mayor rango de cobertura, adaptándose a macroceldas, alta movilidad y muchos usuarios, frente al rango de frecuencias ubicadas en FR2.

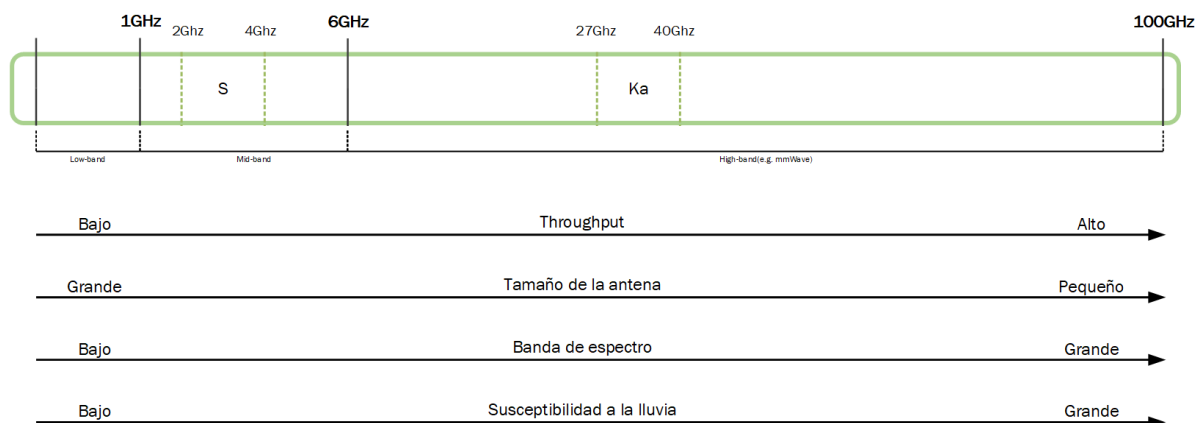


Figura 2.4: Bandas de frecuencias.

En la Figura 2.4 podemos observar que cuanto mayor es la frecuencia el throughput aumenta, siendo este parámetro un indicador del rendimiento, el tamaño de la antena disminuye y tanto la banda como la susceptibilidad frente agentes adversos aumenta.

Banda S

La banda S del Mobile Satellite Service (MSS) está armonizada globalmente por la ITU en el rango de 1980 a 2010 MHz para enlace ascendente, y de 2170 a 2200 MHz para el enlace descendente [20]. Esta banda se utiliza principalmente para comunicaciones móviles, incluidas las IMT-2000 / UMTS, las comunicaciones móviles por satélite y los sistemas de radar meteorológico / para barcos. La frecuencia Industrial, Scientific, Medical (ISM) de 2,4 GHz, ampliamente utilizada, también se incluye en esta banda de frecuencia: la banda de 2,4 GHz y se utiliza para Bluetooth, Wi-Fi, Zigbee y otras tecnologías [21].

Tabla 2.1: Características de la banda S.

Designación de banda de frecuencia	Rango de frecuencia	Longitud de onda
S	2 - 4 GHz	7.5 cm - 15 cm

Como se puede ver en la Figura 2.4, esta banda frente a las superiores es menos susceptible a agentes adversos como la lluvia. Por el contrario, posee menos rendimiento, tiene un espectro de banda estrecha y los tamaños de las antenas son más grandes.

Banda Ka

La banda Ka actualmente se emplea extensamente Satellite Networks Operator (SNO) para ofrecer servicios de banda ancha a los clientes [20]. Con una coordinación adecuada, se podrían prever las siguientes bandas de frecuencias de los servicios fijos por satélite para un uso común tanto de los Mobile Network Operator (MNO) como de los SNO, incluso si no hay especificaciones 3GPP que se estén considerando. Estas bandas son las que se analizarán en este trabajo, siendo el rango de frecuencias empleadas de 17.7 – 20.2 GHz para el enlace descendente y el rango 29.5 – 30 GHz para el enlace ascendente [20].

Tabla 2.2: Características de la banda Ka.

Designación de banda de frecuencia	Rango de frecuencia	Longitud de onda
Ka	27 - 40 GHz	5.0 mm - 11.3 mm

Como se puede ver en la Figura 2.4 permite comunicaciones de datos a alta velocidad, antenas más pequeñas, por tanto se simplifican los costes. Por otro lado, los desvanecimientos causados frente agentes externos son más graves, ocasionando mayores niveles de atenuación [21].

2.2.4. Escenarios

3GPP trabaja en New Radio (NR), con el estudio Release-15, enfocándose en escenarios de implementación y modelos de canal. El primer objetivo del estudio era seleccionar varios escenarios de implementación NTN de referencia y establecer los parámetros claves entre ellos. Se contemplan dos bandas de frecuencia, la banda S y la banda Ka, los satélites en la órbita GEO y LEO, así como HAPS, huellas de haz fijas o variantes y ángulos de elevación. [22]

Modelo de canal NTN

Como se ha mencionado previamente, en el trabajo de estandarización, el primer estudio del NR que da soporte a las tecnologías NTN fue aprobado en RAN#75. A favor de su desarrollo, se enfocó en el estudio del modelo del canal, escenarios de implementación y finalmente, posibles áreas cuyo impacto fuera clave [23]. La intención en ese momento era estudiar los modelos de canal, definir los escenarios de desarrollo, además de los parámetros del sistema, e identificar cualquier área de impacto clave que pudiera necesitar evaluaciones adicionales.

Tabla 2.3: Escenarios de implementación NTN con sus correspondientes características.

Escenarios de implementación		
Características	Implementación D3	Implementación D4
Órbita de plataforma	NGSO	NGSO
Altitud	Hasta 600 Km	Hasta 600 Km
Banda	S	Ka
Frecuencia portadora en el enlace entre la plataforma aérea / espacial y UE	Alrededor de 2 GHz para ambos DL y UL	Alrededor de 20 GHz para DL y 30 GHz para UL
Patrón del haz	Haz en movimiento	Haz fijo
Duplexación	FDD	FDD

En la Tabla 2.3 se puede ver dos de los escenarios sobre los que se motiva este trabajo. Las implementaciones hacen referencia a casuísticas donde solo están presentes las órbitas LEO y MEO, pues el resto de las puestas en práctica formuladas cubren los escenarios restantes. Además, las plataformas han de alcanzar como máximo 600 Km y, a cada una de las implementaciones D3 y D4 se les asigna una banda: la S y la Ka, respectivamente. En la Tabla 2.3 se puede observar dónde se sitúa en el espectro y cómo se emplea la duplexación, en este caso en frecuencia, al tratarse de comunicaciones satelitales [20] [23]. Los modelos de canal desarrollados admiten una gran variedad de escenarios que incluyen entornos urbanos, suburbanos y rurales.

De manera breve, el multitrayecto es un fenómeno típico de la propagación en ambientes terrestres. Para las redes no convencionales, como las NTN, la gran distancia al satélite hace que diferentes caminos sean paralelos y el ángulo de propagación es por tanto cercano a cero. Los parámetros a gran escala como son la probabilidad de visibilidad directa, dispersión angular y dispersión de retardo son diferentes del caso terrestre, y dependen del ángulo de elevación del satélite de servicio [24].

El modelado de la pérdida de trayectoria se basa principalmente en la correspondiente pérdida del espacio libre, pero a su vez agrega componentes de otros desvanecimientos, donde cabe tener en cuenta la atenuación de los edificios circundantes y objetos. Los valores de pérdida de ruido y desvanecimientos se tabulan para diferentes ángulos de elevación y para los dos rangos de frecuencia de banda S y banda Ka. En el modelado del canal un empeoramiento causado por las características mencionadas se verá reflejado como una degradación en la tasa de servicio, siendo μ_{LoS} aquella que posee mejores prestaciones y μ_{ds} la más deficiente.

Es relevante mencionar que los datos empleados a la hora emular el escenario se obtuvieron de bases de datos de medidas de la European Space Agency (ESA). Los datos correspondientes a la banda S, Figura 2.4, se obtuvieron en la universidad de Bradford, Reino Unido, en condiciones de banda estrecha, sobre la frecuencia portadora de 2,618GHz. Los datos consisten en un conjunto completo para varios entornos: abierto, suburbano, urbano, sombreado por árboles y elevaciones: 40 °, 60 °, 70 ° y 80 ° [25].

Finalmente, se obtuvieron tanto la matriz [P], que indica la probabilidad de transición de un estado

Tabla 2.4: Características específicas de los datos de la banda S.

Banda	Técnicas de sondeo	Entornos	Elevaciones
S-2,618GHz	Estrecho	Abierto, urbano, suburbano y arbolado	40° 60° 70° 80°

a otro y la matriz $[W]$ indicando la probabilidad de permanencia en cada uno de los estados LoS, Mid-Shadowing (MS), Deep-Shadowing (DS). Estas matrices poseen una funcionalidad importante, pues soportan la creación de escenarios para su estudio.

2.3. Fundamentos teóricos

En los fundamentos teóricos se tratarán aspectos relacionados con el teletráfico, cuyo fin es estudiar la calidad de servicio de los sistemas de telecomunicación, utilizando para ello la teoría de la probabilidad.

Más adelante, veremos la aplicabilidad de la teoría de colas, una rama matemática que se ocupa del estudio de las colas de espera. Su objetivo es realizar el análisis de sistemas compuestos por uno o varias unidades, llamadas servidores, las cuales se hacen cargo de procesar las tareas encomendadas por otras unidades, llamadas clientes, con la particularidad de que si en algún período de tiempo la llegada de clientes supera la capacidad de procesamiento del sistema, dichos clientes permanecen en cola hasta que sean servidos, como se puede ver en la Figura 2.5.

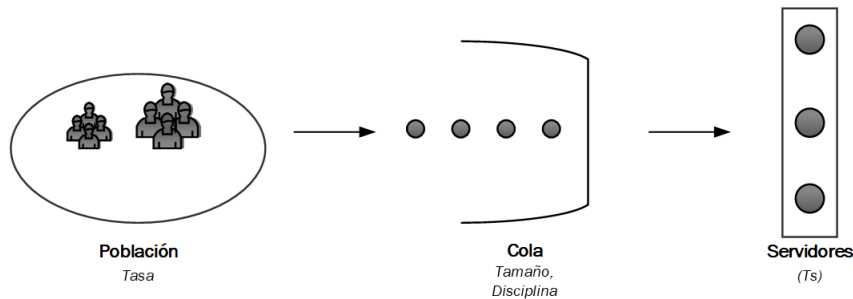


Figura 2.5: Caso genérico de una cola.

Este modelo básico de tráfico [26] se caracteriza porque el número de llegadas en un intervalo de tiempo sigue una distribución de Poisson, la duración de las llamadas sigue una función densidad de probabilidad exponencial negativa y la tasa de llegadas λ al sistema es constante. Además, cabe destacar que un proceso de Poisson implica que el tiempo entre llegadas consecutivas sigue una distribución exponencial negativa, siendo la característica más importante de esta distribución el no tener memoria. Esto se traduce en que los valores 'pasados' no tienen ninguna repercusión en la evolución de la variable, y, por tanto, no afectan a futuros valores.

2.3.1. Terminología básica

El objetivo principal de esta sección es comprender la terminología que va a ser usada en las secciones que le suceden.

Notación Kendall

La notación Kendall se utiliza para describir un sistema de colas y para definir sus características:

A	B	C	D	E	F
Distribución de llegadas al sistema	Distribución de los servicios	Número de servidores (recursos) disponibles	Número de clientes/ servicios	Número de fuentes	Disciplina de la cola

Figura 2.6: Notación de Kendall.

Como se ve en la Figura 2.6, la notación se compone de seis factores:

- **A** especifica cómo se distribuye el tiempo entre las peticiones al sistema, es decir, la variable aleatoria que modela el tiempo entre llegadas consecutivas. Cuando se trata de un proceso de Poisson, se utiliza la letra M, *memoryless*.
- **B** especifica cómo es la variable aleatoria que caracteriza el tiempo de servicio. Si es exponencial negativa, corresponde la letra M.
- **C** número de recursos disponibles.
- **D** capacidad máxima en todo el sistema.
- **E** representa el tamaño de la población, finita o no, lo que varía la tasa de peticiones del sistema.
- **F** especifica la disciplina de la cola que posee el sistema.

Fundamentos

Como se vio en la Figura 2.5, un sistema se compone de diferentes elementos, los cuales dependen de unos parámetros que definiremos en esta sección.

- **Población**, se llama así al conjunto de elementos que genera peticiones a un sistema. La tasa dependerá de si la población es finita o no.
- **Cola**, donde las peticiones aguardan para ser atendidas. Es habitual usar el término *buffer*, el cual puede ser infinito o no. En el último de los casos, aquellas peticiones que no pueden aceptarse, debido a exceso, se rechazarán. Además del tamaño de la cola se puede caracterizar por la disciplina que sigan las peticiones a la hora de ser atendidas.
- **Servidores o recursos** a los que los usuarios acceden tras pasar por la cola. En general, dichos recursos serán idénticos, y la tasa de servicio T_s , será la misma.

2.3.2. Modelado del canal Land Mobile Satellite

Actualmente se trabaja con un modelo estadístico para el canal entre la estación terrestre y satelital LMS, el cual describe condiciones de banda ancha y estrecha. Dicho modelado incluye la variabilidad que pueden tener los canales LMS, mediante una cadena bidimensional de Markov que recoge las

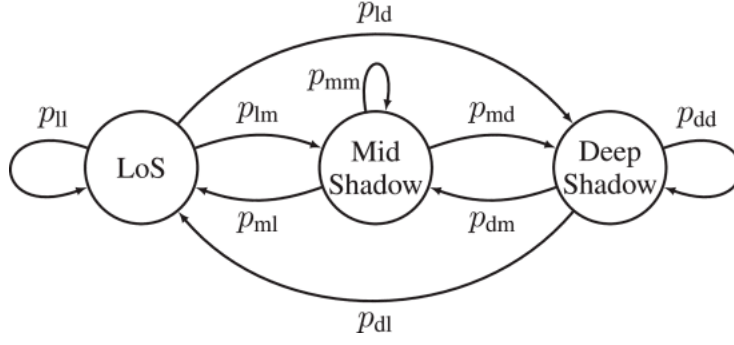


Figura 2.7: Modelo de la cadena de Markov para el enlace ascendente y descendente.

características variables en el tiempo de los enlaces ascendentes y descendentes y la cual presenta una matriz tal como se muestra en 2.1,

$$P = \begin{bmatrix} pll & plm & pld \\ pml & pmm & pmd \\ pdl & pdm & pdd \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

La matriz incluye las transiciones de un estado a otro o a sí mismo, como se puede ver en la Figura 2.7. Siendo los elementos de la diagonal de P los que representan la probabilidad de que permanezca en dicho estado en la siguiente iteración. A través de dichas probabilidades podemos obtener el tiempo de permanencia en cada uno de ellos.

Seguidamente se trata la cadena de Markov con mayor detenimiento, por ello es esencial revisar el siguiente aspecto. A la hora de definir un proceso de nacimiento y muerte, hay que recordar el concepto de proceso estocástico. Una cadena de Markov es un proceso estocástico si para cualquier instante la distribución $X(t)$ depende únicamente de $X(t_{n-1})$ y, hablando de estados depende sólo del estado inmediatamente anterior y no del pasado, como se puede ver en la Figura 2.8. Por este motivo los modelos de cadena de Markov se pueden utilizar para describir el canal de propagación del enlace tierra-aire en un instante determinado.

Esta cadena se caracteriza con tres posibles situaciones, cada uno de ellos viene representado en el diagrama como una fila. Cada estado refleja una tupla de valores (i, j) , donde i indica el número de paquetes y j la situación en el que se encuentra en dicho momento: LoS ($j = 2$), MS ($j = 1$) o DS ($j = 0$).

Los estados emulan una serie de condiciones particulares, basándose en el supuesto de la existencia de tres tasas diferentes de cambio. Cada estado representa unas determinadas características del canal, siendo LoS una situación donde las condiciones son ideales, mientras que en los estados restantes MS y DS se reflejaría un empeoramiento del canal respectivamente, teniendo mayor impacto estos efectos negativos en el último.

Cada estado funciona de manera independiente entre sí, con tasas de servicio diferentes, siendo estas μ_{los} , μ_{ms} y μ_{ds} , como se puede ver en la Figura 2.8. Dichas tasas de servicio se pueden establecer en función de la capacidad efectiva del enlace en cada uno de los tres estados $\mu_s = \frac{C_s}{l}$ donde l es la

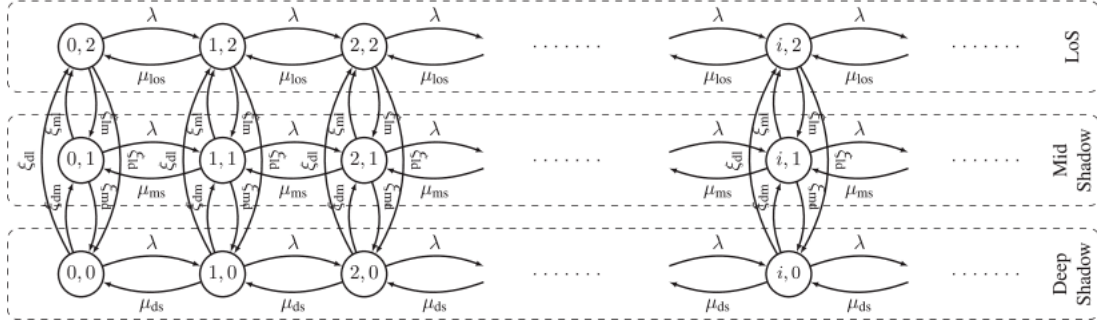


Figura 2.8: Cadena de Markov para los enlaces UP/DL.

longitud media del paquete y C_s la capacidad efectiva para cada uno de los correspondientes estados $s = \{los, ms, ds\}$. Por el contrario, el valor medio de la tasa de llegadas λ se mantiene para cada uno de los estados. Como se puede ver en el diagrama en cada una de las situaciones del canal se puede ir hacia las dos restantes con una tasa ξ_{sr} donde $s \neq r$. Esta tasa depende de la probabilidad α_{sr} donde $s \neq r$, que indica la probabilidad de cambiar de un estado a otro que sea distinto. Además, η_s^{-1} indica el tiempo que el canal permanece en el mismo estado, modelado mediante una variable exponencial negativa. Por tanto, como resultado obtenemos la tasa de transición vertical $\xi_{sr} = \alpha_{sr} \eta_s^{-1}$.

2.3.3. Teorema de Jackson

En esta sección se pretende explicar desde el punto de vista contextual las premisas del Teorema de Jackson. Para ello, la explicación se apoya en el modelo desarrollado en [17] donde la comunicación UP/DL se modela mediante la cadena denominada previamente LMS, mientras que entre satélites la comunicación se asume ideal, estando ésta compuesta por una cadena de nodos M/M/1.

En la teoría de colas existe una propiedad, que deriva del Teorema de Burke, donde bajo las condiciones de equilibrio, la salida de un M/M/1 con una tasa de llegada λ es un proceso de Poisson de tasa λ , siempre y cuando en el modelo no haya pérdidas, es decir, M/M/k o M/M/ ∞ , sistemas de espera pura.

Además otro de los teoremas en el que se basa las redes de Jackson es el Teorema de Reich, que expone que los retardos de una cadena de sistemas son independientes entre sí, siendo su cómputo total el sumatorio de todos ellos.

A la hora de tratar las redes de colas, se pueden clasificar en dos grupos. En primer lugar, en las redes abiertas los clientes externos al sistema pueden introducirse en diferentes colas obteniendo finalmente diferentes servicios. Posteriormente, pueden volver a pasar por una misma cola, pero finalmente deben abandonar el sistema. En cambio, en las redes cerradas la cifra de clientes se mantiene constante en el tiempo, cumpliéndose que ningún nuevo cliente se une o abandona la red. Como consecuencia de la ausencia de agregación nueva de tráfico, la premisa del teorema de Burke no es estrictamente necesaria, en la medida en que no es necesario disponer de buffer infinito con el objetivo de que no haya pérdida, en virtud de que el número de clientes es constante. Por tanto, el tamaño de cola sería igual a $N-1$, siendo N el número de clientes. Los clientes que finalizan un servicio en una cola van a otra hasta recibir el servicio correspondiente, este hecho ocurre en bucle, pues los clientes no pueden dejar el sistema.

Una vez asumido este concepto, nos enfocamos en las redes de Jackson abiertas. Podemos clasificarlas en dos tipos, por un lado las acíclicas, tratándose de que un cliente nunca atraviesa la misma cola para

obtener un servicio, o bien no acíclicas, en la cuales los criterios básicos no se cumplen, en otros términos, la independencia entre los tiempos de llegada y entre los tiempos de llegada y de servicio no se sustentan [27].

En una red de Jackson abierta los nodos deben tener cola infinita, puesto que no se permite que haya pérdidas para el debido cumplimiento del Teorema de Burke. Esto subyace en que las redes abiertas tienen permitidas la incorporación de tráfico externo, que posteriormente otros nodos se encargan en drenarlo. Las disciplinas de las colas son First In, First Out (FIFO). Los tiempos de servicio se distribuyen como variables aleatorias exponenciales negativas, e independientes frente a las llegadas de paquetes a las colas y sus previos tiempos de servicio. Adicionalmente los nodos han de ser estables, $0 \leq \rho \leq 1$ y cumplir que las probabilidades de encaminamiento de un nodo a otro deben sumar uno. Por tanto, cuando un cliente ha sido procesado por un nodo i , este tiene una probabilidad P_{ij} para ir al nodo j , o bien abandonar el sistema con una probabilidad igual a $1 - \sum_{i=1}^N P_{ij}$.

Modelo de comunicación entre dos estaciones terrestres

En la Figura 2.9 podemos apreciar una serie de nodos: en primer lugar, podemos ver dos de tipo GS_{sr} y GS_{dst} , que simulan ser las dos estaciones terrestres, respectivamente la fuente y el destino. Además, en la parte central, interconectando los dos extremos, podemos observar una serie de enlaces con condiciones ideales, conectados por los sistemas de cola S_k .

Una vez llegados a este punto debemos realizar un inciso. Tras ser descrito el sistema global como un conjunto de nodos interconectados entre sí, podemos hablar de un concepto nuevo, denominado red de sistemas de cola. En este sistema global, cada nodo emula una cola, la conexión de estos subsistemas se realiza mediante un enlace. El conjunto de nodo y enlace conforman un grafo. La relación que establecen dos entidades se determina mediante una probabilidad de encaminamiento.

Para el análisis de un sistema global de este calibre se emplea un modelo sistemático, en el cual se emplean la matrices de transición. Esta matriz deriva de las siguientes expresiones matemáticas:

$$p_{ij} \in [0, 1] \quad \sum_{j=0}^N p_{ij} = 1 \quad \forall i = 1 \dots N \quad (2.2)$$

$$p_{ij} = \frac{\lambda_{ij}}{\lambda_i} \quad \lambda_i = \sum_{j=0}^N \lambda_{ij}$$

Donde p_{ij} representa la probabilidad de encaminamiento de la información entre dos nodos consecutivos y cuyo sumatorio debe ser uno. Esta probabilidad deriva de la matriz del flujo de la información, parametrizado mediante la tasa λ_{ij} [28].

Como se vio anteriormente, en los nodos en los que no hay pérdidas la salida ha de ser igual que su entrada. Por tanto, trataremos de caracterizar la salida del nodo LMS, que emula el comportamiento del canal en la subida y la bajada de tráfico, puesto que posteriormente ese flujo de tráfico atravesará una serie de nodos M/M/1.

En el caso del modelo de red representado en la Figura 2.9 se puede ver que el flujo de la información avanza en una única dirección, por tanto se asume que la probabilidad de encaminamiento de un nodo a otro p_{ij} es la unidad.

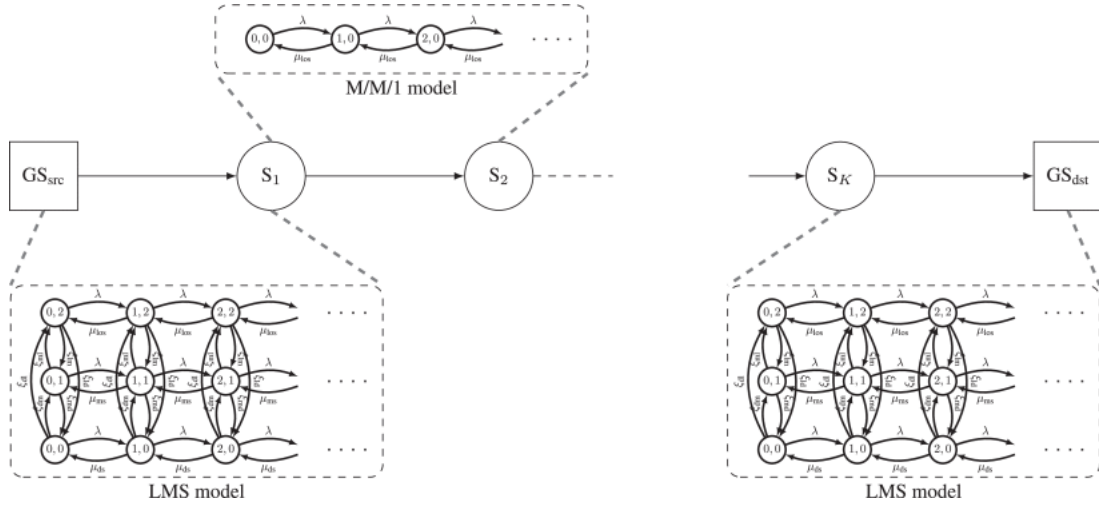


Figura 2.9: Cadena de Markov UP/DL.

2.3.4. Conceptos teóricos sobre las medidas

En esta sección llevaremos a cabo un entendimiento de los conceptos que se emplearán en el Capítulo 4 para un análisis exhaustivo de los resultados obtenidos en este trabajo.

Poisson

Se trata de una distribución de probabilidad discreta, popularmente conocida por modelar el número de veces que ocurre un evento en un intervalo de tiempo. A la hora de su interpretación se puede considerar como una distribución binomial, donde el número de experimentos es muy grande y la probabilidad de que ocurra un evento sea bajo [26] [27] [29]. Por tanto, se puede decir que se emplea para sucesos poco frecuentes. Los parámetros característicos de esta variable son:

- **Media**

$$\lambda = n \cdot p \rightarrow \eta = \lambda \quad (2.3)$$

- **Varianza**

$$\sigma^2 = \lambda \quad (2.4)$$

- **Proceso de Poisson**

$$P(n) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^n}{n!} \quad n = 0, 1, 2, \dots, \forall t \quad (2.5)$$

Como bien se ha dicho previamente esta distribución suele modelar el número de veces que ocurre un evento en un intervalo T de tiempo, a este proceso se le suele llamar proceso de conteo, pero cuando tratamos eventos denominados llegadas a un sistema, se habla de un proceso de Poisson. Ahora bien, este proceso se da cuando el tiempo entre llegadas sigue una variable exponencial negativa. Esto se debe a que es un proceso sin memoria y, en consecuencia, las llegadas no guardan ningún tipo de relación entre sí [26].

Se procede a explicar porqué el tiempo entre llegadas es exponencial negativo y por tanto sin memoria; como se contempla en la Figura 2.10, en un intervalo de tiempo se produce un evento X_1 , en otras palabras

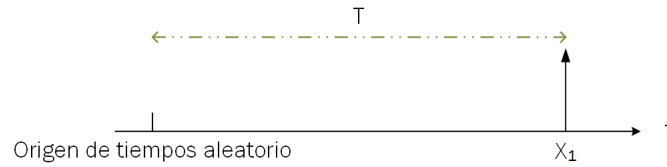


Figura 2.10: Llegada X_1 a un sistema tras un intervalo T .

X_1 se puede denotar como el tiempo hasta el primer evento, partiendo de un origen aleatorio. Por tanto la probabilidad de que X_1 sea mayor que T , coincide con la probabilidad de que no sucedan llegadas en T .

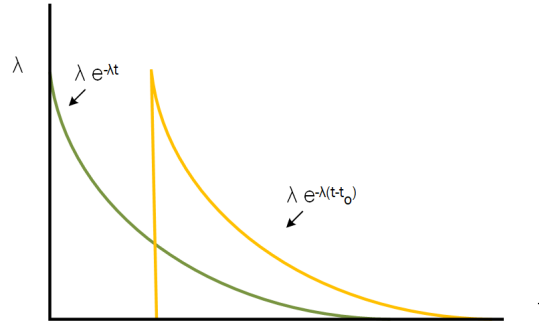


Figura 2.11: Tiempo entre llegadas sin memoria.

Sustituyendo $n = 0$ obtenemos la siguiente expresión $Pr(X_1 > T) = e^{-\lambda T}$. Concluyendo, la función de distribución se puede obtener como se aprecia en la ecuación 2.6 y a partir de ella derivando la función de densidad 2.7:

$$F_x(T) = Pr(X \leq T) = 1 - e^{-\lambda T} \quad (2.6)$$

$$f_x(T) = \frac{dF_x(T)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2.7)$$

Tiempo entre salidas

En un sistema M/M/1, los tiempos entre llegadas y el tiempo de servicio se modelan como variables exponenciales negativas cuya media es λ^{-1} y μ^{-1} correspondientemente. Como nos encontramos en un modelo donde la población y la cola es infinita, además de solo tener un recurso, cuyo porcentaje de utilización viene determinado por la siguiente expresión $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$, podemos determinar la distribución de la salida.

Gracias al teorema de la probabilidad total podemos obtener la función de distribución en un determinado instante del nodo M/M/1. Recordando que las probabilidades de que esté sin utilizarse el recurso o bien este ocupado son las siguientes:

- La probabilidad de que el recurso no está trabajando viene determinada por $1 - \rho$
- La probabilidad de que esté ocupado es ρ

La función de densidad de probabilidad en cada uno de los sucesos es:

- Suceso (*No esté ocupado*)

$$F_{1-\rho}(t) = 1 - \frac{\mu}{\mu - \lambda} e^{-\lambda t} + \frac{\lambda}{\mu - \lambda} e^{-\mu t} \quad (2.8)$$

- Suceso (*Esté ocupado*)

$$F_{\rho}(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (2.9)$$

Donde la ecuación 2.8 se conforma en parte por la distribución del tiempo hasta la siguiente llegada al sistema más su tiempo de servicio. En cambio en la 2.9 se conforma únicamente por el tiempo de servicio debido a que es cuando el nodo M/M/1 está ocupado.

Por tanto, la suma de ambos sucesos multiplicados por su correspondiente probabilidad, de manera simplificada sería:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \text{ para } t \geq 0 \quad (2.10)$$

Concretando, en un sistema el cual es estable $\rho < 1$ y no hay pérdidas en sistema, es por ende que el proceso de llegadas seguiría una misma distribución que el proceso de salidas. Como consecuencia de que el tiempo de salidas sea exponencial negativo se puede concluir que el proceso será de Poisson. En caso de que el tiempo de servicio no fuera exponencial negativo, dicha conclusión no se satisfaría. [29]

Coeficiente de dispersión

El coeficiente de dispersión también conocido como Relative Standard Deviation (RSD), se define como la relación de la desviación estándar σ frente a la media. Por tanto, representa el grado de dispersión en relación con la media de una magnitud. Siendo:

$$\sigma^2 = E[X^2] - E[X]^2 \quad (2.11)$$

$$\eta = E[X] \quad (2.12)$$

$$c.v = \frac{\sigma}{\eta} \quad (2.13)$$

Se puede calcular el coeficiente de variación en la ecuación 2.13 sustituyendo a partir de las ecuaciones 2.11 y 2.12, quedando como consecuencia el cociente entre la desviación típica y la media.

Este indicador aplicado a la teoría de colas nos informa si el tráfico cumple las propiedades de un patrón de llegadas de Poisson, si el tiempo entre llegadas es exponencial negativo, y si la división entre la desviación típica y la media corresponde a la unidad.

Desarrollo y metodología

En este capítulo se explicarán la herramientas empleadas en el transcurso del proyecto para la obtención de los resultados que se analizarán en el siguiente capítulo. Seguidamente se especificarán los criterios que se han aplicado para obtener las mediciones necesarias para evaluar los datos.

3.1. Herramientas utilizadas

En este trabajo se han empleado diferentes medios con distintas funcionalidades y aportaciones, por ello se pretende describir los aspectos relevantes de los mismos en la investigación.

3.1.1. Simulador de eventos

Se ha empleado un simulador desarrollado por el GIT. Dicho simulador está controlado mediante eventos y ha sido implementado en C++. Esta herramienta considera tres tipos de eventos diferentes:

1. Llegada de un nuevo paquete.
2. Transmisión de un paquete.
3. Cambio de estado del canal.

Cada uno de estos eventos están acogidos a las características que hayan sido determinadas previamente del enlace a simular, se puede señalar que dichos eventos generan unas huellas, las cuales posteriormente se utilizan para realizar un análisis de dichos datos. El simulador considera actualmente dos tipos de enlaces, emulando un enlace LMS o bien un enlace ISLs. Mientras que los enlaces ISLs sólo realizan los dos primeros eventos, pues se trata de enlaces ideales, es decir M/M/1, mientras que el enlace LMS incluye los tres tipos de eventos, pues el último es característico y necesario de él. Como se explicó en el Capítulo 2, los enlaces, ascendente y descendente, cambian las condiciones del estado del canal.

Fichero .JSON

JavaScript Object Notation (JSON) es una formato sencillo, basado en texto e independiente del idioma para definir formatos de intercambio de datos. Es decir, JSON es un formato de texto que es completamente independiente del lenguaje, pero utiliza convenciones que son familiares para los

programadores de la familia de lenguajes C, incluido C, C++, C#, Java, JavaScript, Perl, Python y muchos otros. Estas propiedades hacen de JSON un lenguaje de intercambio de datos ideal [30] [31].

En este caso, el simulador a través de este tipo de archivo de datos ha sido empleado para dar estructura al modelo que se iba analizar, indicando los parámetros como tamaño de buffer, número de nodos M/M/1 a poner, los cuales conforman los enlaces ISLs, y matrices que modelan el comportamiento del enlace LMS, las tasas respectivas a cada estado del canal. Es decir, permite la creación de diferentes escenarios. Este archivo pasaba directamente al simulador de donde extrae los datos para crear el escenario a simular del que posteriormente se obtendrían los datos.

3.1.2. Python

Python es un lenguaje de programación de alto nivel, orientado a objetos, con una semántica dinámica integrada, principalmente para el desarrollo web y de aplicaciones informáticas.

Un script es un término informal para un archivo de programa de nivel superior, para ejecutarse directamente, mientras que los módulos están diseñados para ser importados [32].

En este caso el código desarrollado en python se ha empleado para modificar el archivo .JSON, así como también a modo orquestador del simulador desarrollado en C++, para obtener los datos deseados que posteriormente serán útiles en el análisis de los mismos.

3.1.3. MATLAB

MATLAB es una plataforma de programación diseñada específicamente para los ingenieros y científicos. El corazón de MATLAB es el lenguaje MATLAB, basado en matrices, que permite la expresión más natural de las matemáticas computacionales [33].

En este caso, esta herramienta ha sido utilizada para analizar y procesar las trazas adquiridas del simulador previamente, realizando con ella las funciones necesarias como el manejo de grandes cantidades de datos, algoritmos para obtener las funciones de distribución y a su vez la representación en gráficas.

3.2. Metodología

En este área del trabajo se pretende ratificar el marco teórico mediante el simulador desarrollado por GIT, en base a la premisa del cumplimiento de los teoremas que subyacen en las redes de Jackson abiertas.

Esta sección se centra en el estudio de la Banda S. Las capacidades de cada estado son asignadas a partir de las condiciones de LoS, haciendo de esta manera un barrido de las condiciones de MS a partir de la capacidad previa y consecutivamente con el estado de DS. Notándose así en las capacidades el empeoramiento del canal y recorriendo varios escenarios.

Se modela la cola del sistema de manera ideal, donde el buffer tendría un tamaño infinito, lo que permite realizar una simplificación del modelo, en esta implicación no se producen pérdidas por saturación en el buffer. Otra aportación en el modelo es limitar el buffer, de esta manera proporcionamos realismo, para observar cómo afectan las pérdidas debidas a la saturación en el mismo.

Es por eso que a la hora de llevar a cabo las medidas en el caso de buffer infinito, se debe cumplir el régimen de estabilidad, para lo que es necesario obtener la λ_{max} . Por lo contrario, al tratarse de un buffer finito, el sistema no posee limitaciones.

La limitación impuesta por la tasa de llegadas, se obtiene mediante las tasas de servicio de cada uno de los estados y la probabilidad de permanecer en cada uno de ellos; cabe recalcar que estas probabilidades [W] se obtienen de la matriz [P] y no asumen que en media sea estrictamente necesario haber pasado por cada uno de los estados.

En función de lo que se ha querido medir a partir de los datos obtenidos del simulador, se ha realizado un procedimiento u otro, mientras que el foco siempre ha apuntado a los eventos de salida, pero con un tratamiento diferente.

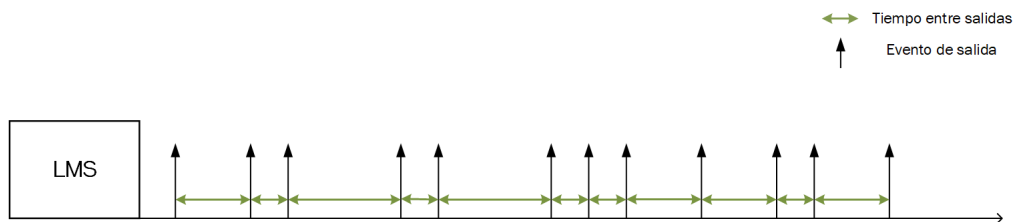


Figura 3.1: Eventos de salida del nodo que modela el canal ascendente y descendente.

En la Figura 3.1 se puede ver cómo los eventos salen del nodo LMS, denotado con las flechas verticales y el tiempo entre salidas denotado por la flecha de color verde situada entre las verticales.

3.2.1. Distribuciones de los eventos de salidas

A la hora de observar el proceso de salidas y la distribución del tiempo entre las salidas (ver Figura 3.1), se han seguido dos tipos de procedimientos.

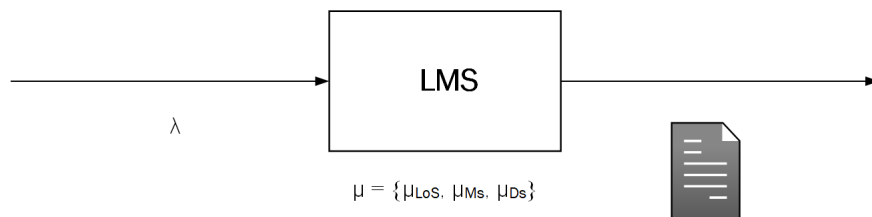


Figura 3.2: Procedimiento para obtener la distribución del tiempo entre salidas y la distribución del proceso.

Ambas medidas tienen en común el procedimiento llevado a cabo en el simulador y en el script pues, como se visualiza en la Figura 3.2, se introduce una única tasa de llegadas y se obtiene un fichero de resultados con las trazas de las salidas del nodo, siendo necesario una única fuente de datos.

Distribución del tiempo entre salidas

En esta situación lo primero que hacemos es la diferencia entre una salida y otra. En el caso de tratarse de un buffer finito tenemos que discriminar aquellas salidas que posean valor cero, lo que ocurre cuando el paquete ha sido descartado. Por otro lado esta circunstancia no ocurre al tratarse de un buffer infinito, al ser de espera pura, no se descartan paquetes, debido a poseer una cola infinita. Una vez se ha abordado el

primer paso, se continua empleando funciones proporcionadas por MATLAB, para obtener la función de densidad de probabilidad.

Se procede a explicar las funciones: En primer lugar se utiliza la función **hist()**.

- Los parámetros de entrada son el vector con los tiempos entre salidas y el número de barras que posee el histograma.
- La parte más interesante de esta función es cuando devuelve los vectores de salida, el primero de los vectores indica el número de elementos de los que se compone una muestra, los cuales han sido extraídos del vector que contiene los tiempos entre salidas, mientras que en el segundo de los vectores recoge los valores medios de cada intervalo.

A posteriori, se procede a normalizar los valores, pudiendo obtener así la probabilidad de calcular cierto valor.

$$pdf[i] = \frac{my[i]}{L\Lambda(mx[i])} \quad (3.1)$$

En la ecuación 3.1, se puede ver que el número de elementos que compone la muestra es representado mediante $my[i]$, L el número de elementos totales y finalmente $\Lambda(mx[i])$ representa la diferencia entre la media de dos valores, conformando así el producto de la longitud L y la anchura de las barras (intervalos) que se utilizan para generar el histograma.

Distribución del proceso de salidas

En el tratamiento de los datos con el fin de adquirir la caracterización del tráfico en la salida del nodo, se ha desarrollado un algoritmo de conteo. A diferencia del anterior método, no se necesita el tiempo entre las salidas, pues se trata de observar los eventos de las salidas y ver cómo se producen.

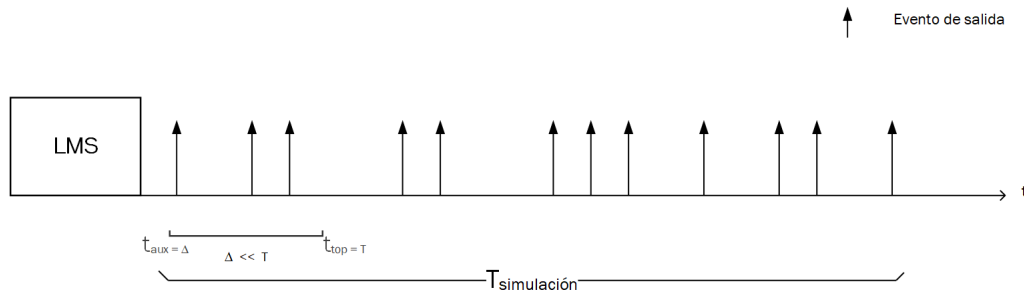


Figura 3.3: Proceso para obtener la distribución de los eventos de salida de un nodo.

Como se ve en la Figura 3.3, recorreremos un tiempo de simulación, el fin del tiempo viene marcado por el último evento que haya salido del nodo. El recorrido se hace mediante una ventana de tiempo, la cual se va desplazando hasta llegar al límite máximo a través del parámetro Λ . Cabe recalcar que dicho

parámetro Λ debería ser notablemente inferior al slot de la ventana T .

Algoritmo 1: Algoritmo para obtener la distribución de Poisson.

Data: $T_{simulation}, \Lambda, T, Trazas$

Result: *distribution*

$t_{aux} \leftarrow 0$

while $t_{aux} + T \leq T_{simulation}$ **do**

$t_{top} = t_{aux} + T$

$frequency = find(t_{aux} < Trazas \ \& \ Trazas \leq t_{top})$

$distribution(num + 1) = distribution(num + 1) + 1$

$taux = taux + \Lambda$

end

En el algoritmo 1, se puede ver, cómo se ha implementado un proceso de conteo, donde se contempla en un intervalo de tiempo específico el número total de ocurrencias de un determinado evento. Así, se puede inferir que el suceso ha de tomar valores enteros, positivos y debe ser creciente, lo que matemáticamente se puede denotar como un suceso estocástico. Matemáticamente expresado como:

$$N(t) \in \mathcal{N} = 0, 1, 2, \quad (3.2)$$

$$Si \ s < t, \text{ entonces } N(s) \leq N(t). \quad (3.3)$$

Una vez recorrido el tiempo hasta la salida del último paquete, lo que obtenemos en un vector, es el número de veces que ha ocurrido un número n de salidas en un intervalo específico de tiempo, el número n de salidas corresponde con el índice del vector. Finalmente se obtiene el cómputo total de salidas, a través del vector y se normaliza; por medio de este procedimiento final obtenemos la probabilidad de que sucedan n eventos.

3.2.2. Coeficiente de dispersión del tiempo entre salidas.

Para la obtención del coeficiente de dispersión del tiempo entre salidas de manera precisa se han realizado un número elevado de simulaciones de Monte Carlo barriendo la tasa λ . Con este fin, se ha hecho empleo del simulador entregándole los parámetros mediante el archivo .JSON, al cual mediante el script de Python se ha ido modificando cada rango de simulaciones.

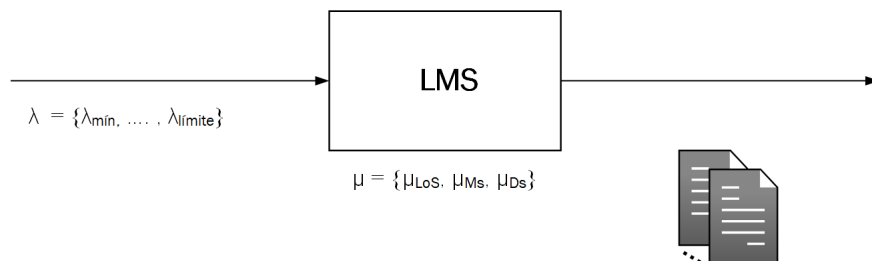


Figura 3.4: Procedimiento de obtención de resultados.

Como se refleja en la Figura 3.4 por cada división de λ , se han ejecutado un elevado número de simulaciones independientes entre sí, con el objetivo de obtener datos más precisos y dotarles de mayor

calidad. En los datos puros que nos proporciona el simulador podemos encontrar trazas de diferentes huellas, estas huellas visibilizan con cifras la evolución desde que un paquete entra al sistema hasta que lo abandona. De toda la información que nos proporciona el simulador, escogemos aquella que nos muestra el instante de salida del nodo.

En el caso de ser buffer infinito, la tasa de llegadas la tendremos que recorrer hasta el límite marcado por la tasa máxima, λ_{max} , cumpliendo de este modo el régimen de estabilidad marcado por el sistema. Mientras que en el caso en el que el buffer es finito no existe un límite máximo.

Una vez obtenidas las trazas, han de analizarse con el fin de caracterizar cómo se comporta el sistema. Es así que el primer paso es obtener el tiempo entre salidas, como se mencionó en la sección 3.2.1, pero sin la necesidad de obtener la función de densidad de probabilidad. Posteriormente se calcula la media y la desviación típica de los datos, y luego se prosigue con la obtención del coeficiente de dispersión y la media del número de simulaciones correspondientes a dicho coeficiente. Cabe remarcar que con este indicador se puede notar cuándo se trata de un tráfico de Poisson.

Como se mencionó de una manera sutil en capítulos previos, el que un tráfico sea de Poisson, implica de manera directa que el tiempo entre llegadas sea *memoryless*, es por ello que ante la incertidumbre del comportamiento a la salida del nodo, se aplica el parámetro con el fin de definir cómo es.

Resultados

Recapitulando, tras haber hecho un repaso del marco teórico, con la finalidad de poder ver dónde se sustenta este trabajo y haber expuesto la estrategia de obtención de resultados, llegados a este punto, nos centraremos en explicar y analizar los resultados de los distintos escenarios implementados sobre la Banda S.

4.1. Caracterización del tráfico de salida del nodo LMS

El enlace LMS que se va a analizar pertenece a un entorno residencial. A continuación se presentan los datos en común que poseen todos los escenarios. Las matrices de transición entre estados del canal y la probabilidad de permanecer en cada uno de ellos como se vio en secciones previas, obtenidas de la investigación [25].

Tabla 4.1: Parámetros del enlace LMS en la banda S.

Banda S	
Parámetros enlace LMS	
Matriz de transición	$P = \begin{pmatrix} 0,8177 & 0,1715 & 0,0108 \\ 0,1544 & 0,7997 & 0,0459 \\ 0,1400 & 0,1433 & 0,7167 \end{pmatrix}$
Probabilidades de estado	$W = [0,4545 \quad 0,4545 \quad 0,0910]$

De las matrices representadas en la Tabla 4.1, se derivan las tasas de salida de un estado a otro, y la probabilidad con la que ocurre una transición entre estados distintos, según el modelado visto anteriormente.

Además, como se puede ver en la Tabla 4.2, la capacidad en el estado LoS es superior a las demás, a partir de la cual se va a diezmar, resultando la tasa MS y, por último, como se aprecia en la tabla, la capacidad de DS se va modificando respecto a las demás, en tanto en cuanto en cada uno de los casos se va a llevar a cabo un análisis.

En la presente Tabla 4.3 se puede visualizar los escenarios que se van a estudiar, donde se puede notar

Tabla 4.2: Capacidades del enlace LMS en la banda S.

Capacidad en LoS Rb	5 Mbps
Capacidad en MS	$0.8Rb$
Capacidad en DS	$\{0.4Rb, 0.2Rb, 0\}$
Longitud media de los paquetes	125 B

Tabla 4.3: Escenarios analizados.

Configuración [ms^{-1}]	Buffer	λ [ms^{-1}]
[5; 2,5; 2]	∞	2.4
[5; 2,5; 1]	∞	[1.5, 0.5]
[5; 2,5; 0]	∞	[1.5, 0.5]
[5; 2,5; 2]	7,15	[3, 1.5, 0.5]
[5; 2,5; 1]	7,15	[3, 1.5, 0.5]
[5; 2,5; 0]	7,15	[3, 1.5, 0.5]

que las prestaciones son variables, lo cual tiene un impacto sobre la capacidad. Podemos visualizar situada en la primera columna, las tasas de servicio empleadas por cada uno de los estados, en el correspondiente orden: Line of Sight LoS, Mid-Shadowing MS, Deep-Shadowing DS. También se puede apreciar que, en condiciones ideales, se pretende mantener la tasa, de la cual derivan las otras, con un ligero empeoramiento, hasta obtener el momento más drástico representado por condiciones de desvanecimientos profundos.

4.1.1. Tiempo entre salidas

En esta sección se muestran las distribuciones del tiempo entre salidas del nodo LMS, tanto para buffer infinito como para el buffer limitado a un tamaño, 7 y 15, como se puede ver en la Tabla 4.3.

Buffer infinito

En la Figura 4.1 se refleja la distribución del tiempo entre salidas de un nodo LMS. Al tratarse de una cadena con cola infinita, el sistema se ve limitado por λ_{max} , siendo esta tasa de llegadas dependiente del escenario a estudiar, Tabla 4.4.

Como se puede ver en la Figura 4.1, en cada una de ellas se usan las λ que preservan las condiciones de equilibrio, sin superar la tasa marcada por cada configuración. Se puede ver que los resultados de 4.1a y 4.1b, se asemejan a la exponencial negativa ideal, aun siendo la primera de ellas la que mas similitud posee respecto a la distribución mencionada. A medida que la capacidad en condiciones de Deep-Shadowing se acerca a cero, podemos notar un cambio notable en la distribución del tiempo entre salidas, siendo en la última 4.1c cuando el tiempo entre llegadas es menos probable, pues las llegadas se tienden a acumular, ya que la capacidad de procesado es nula cuando se encuentra en una condición de desvanecimiento profundo.

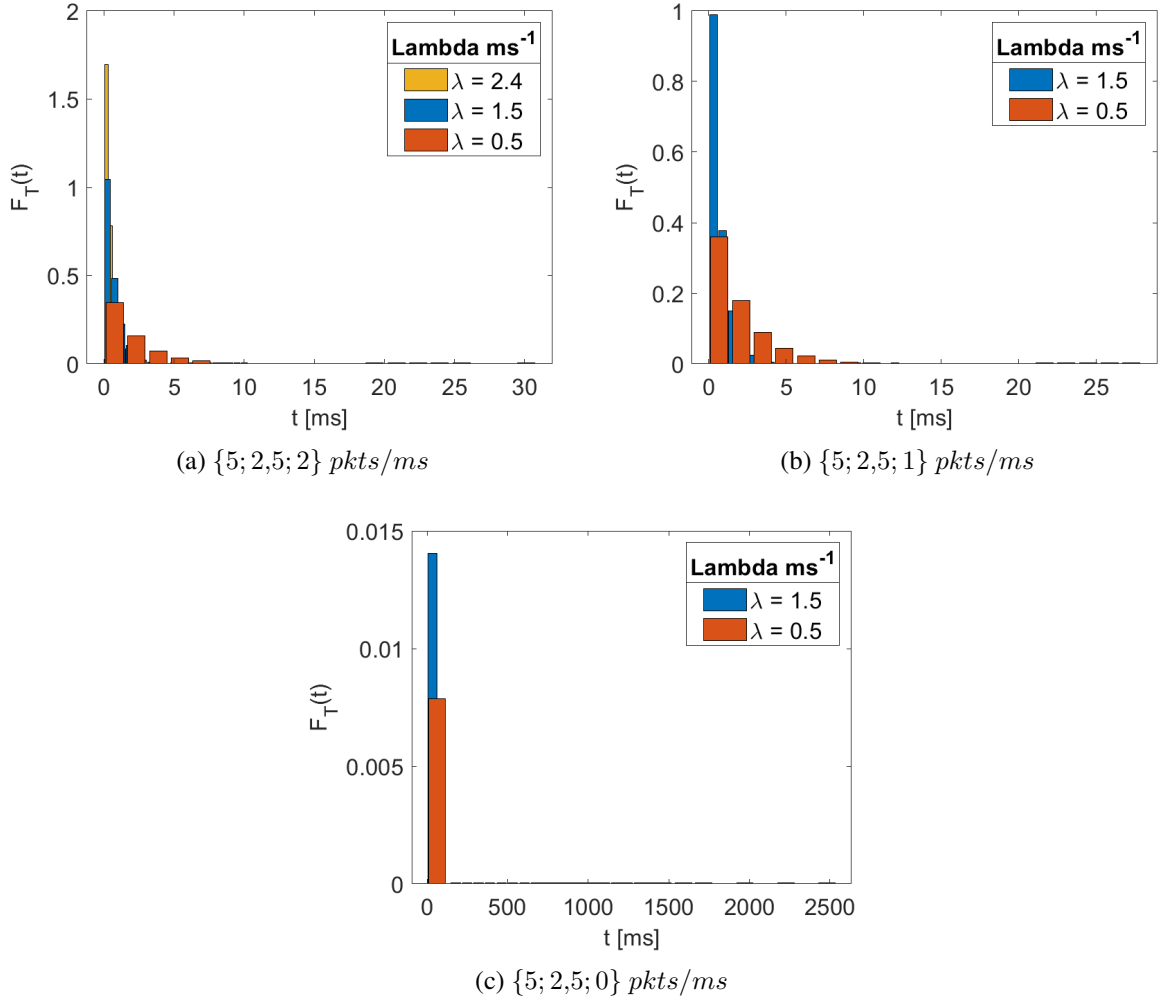


Figura 4.1: Tiempo entre salidas para buffer infinito.

Este hecho, como se mencionó en capítulos previos viene representado por uno de los tres estados posibles que posee el modelado del canal. Es relevante destacar, el acontecimiento de valores atípicos a medida que se avanza en el eje de abscisas, resultado de una parada al llegar al estado Deep-Shadowing, tras pasar un tiempo de permanencia hasta volver a reiniciarse, esto significa un cambio de estado, donde la tasa de servicio no debe ser nula, dándose una ligera probabilidad para tiempos entre salida elevados.

Tabla 4.4: Tabla con las λ_{max} respectivas a la tasa de Ds .

$\lambda_{max} [pkt/ms]$ para Ds		
$Ds = 2$	$Ds = 1$	$Ds = 0$
2.50	2.05	1.59

En el Tabla 4.4 se puede ver las respectivas tasas de llegadas máximas, las cuales se obtienen de las tasas de servicio y las probabilidades de permanecer en cada uno de los estados.

Buffer finito

Tras analizar un contexto ideal, se estudian escenarios, con buffer finito, atribuyendo de esta manera valor al estudio del canal LMS. En este marco, la tasa de llegadas no se ve limitada y, por tanto realizamos un barrido que excede los límites marcados por la configuración anterior, viendo el impacto que esto supone en el sistema. Continuamos variando el canal de DS, con el fin de ver el impacto en el sistema que ello conlleva. Aquellos paquetes que no pueden admitirse en el buffer son rechazados.

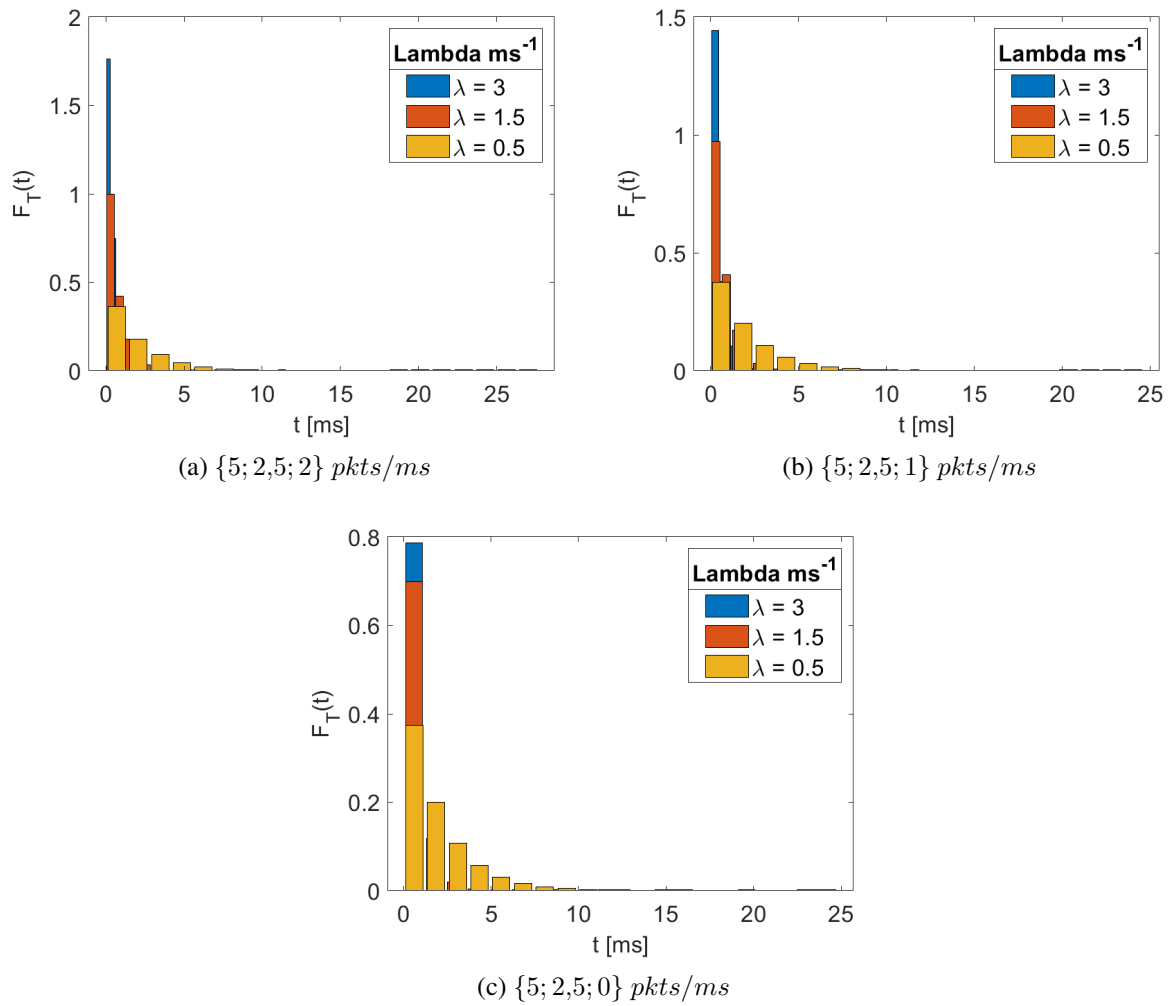
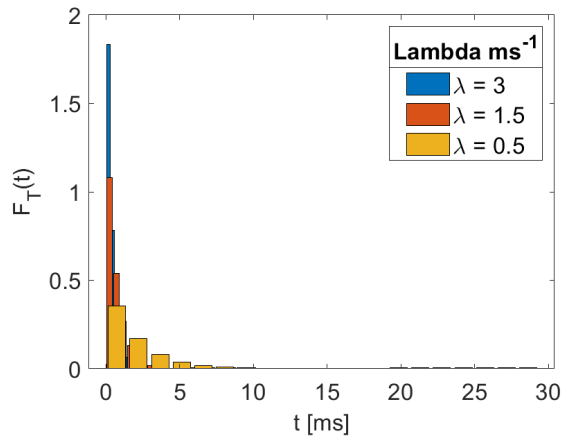
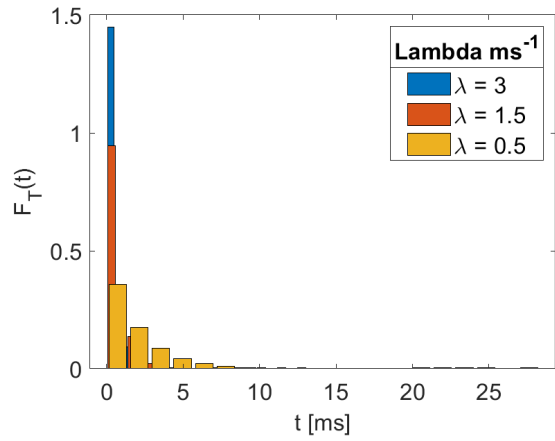


Figura 4.2: Tiempo entre salidas para buffer finito 7.

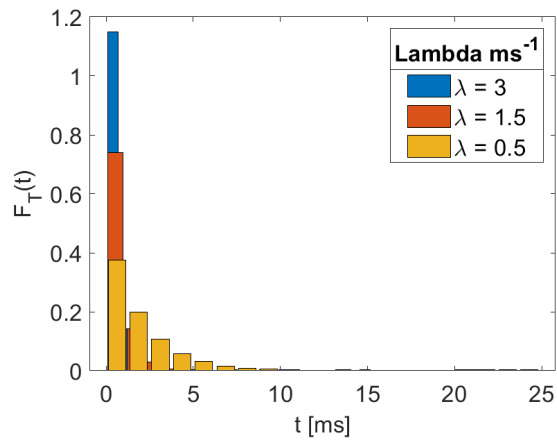
En estos dos casos podemos ver un cambio sustancial en el hecho de que la tasa de Deep-Shadowing posea valor cero, cuando se llega a este estado el procesamiento de información se para, pero lo importante es que se puede ver en las respectivas gráficas 4.3c, 4.2c que no se producen eventos de salida muy espaciados en el tiempo. Ello es consecuencia de tener el buffer limitado a un tamaño, pues cuando se llega a saturar los paquetes de información, y no haber capacidad de almacenamiento para ellos, son descartados.



(a) $\{5; 2,5; 2\}$ *pkts/ms*



(b) $\{5; 2,5; 1\}$ *pkts/ms*



(c) $\{5; 2,5; 0\}$ *pkts/ms*

Figura 4.3: Tiempo entre salidas para buffer finito 15.

4.1.2. Distribución del tráfico a la salida del nodo LMS

Caracterizar el proceso de los eventos de salida nos sirve para contrastar de alguna manera el hecho de cuán cierto es asumir que es el tráfico de Poisson, en tanto en cuanto, un suceso implica el otro y viceversa. A diferencia de las gráficas que son descritas en el apartado previo, estas proporcionan mayor fiabilidad si se cumple o no, al analizar los datos, la implicación previamente mencionada.

Buffer infinito

Como bien se mencionó previamente para garantizar el equilibrio en el sistema, la tasa no debe exceder las condiciones de equilibrio. A continuación se procede a caracterizar el tráfico de salida de un nodo ideal.

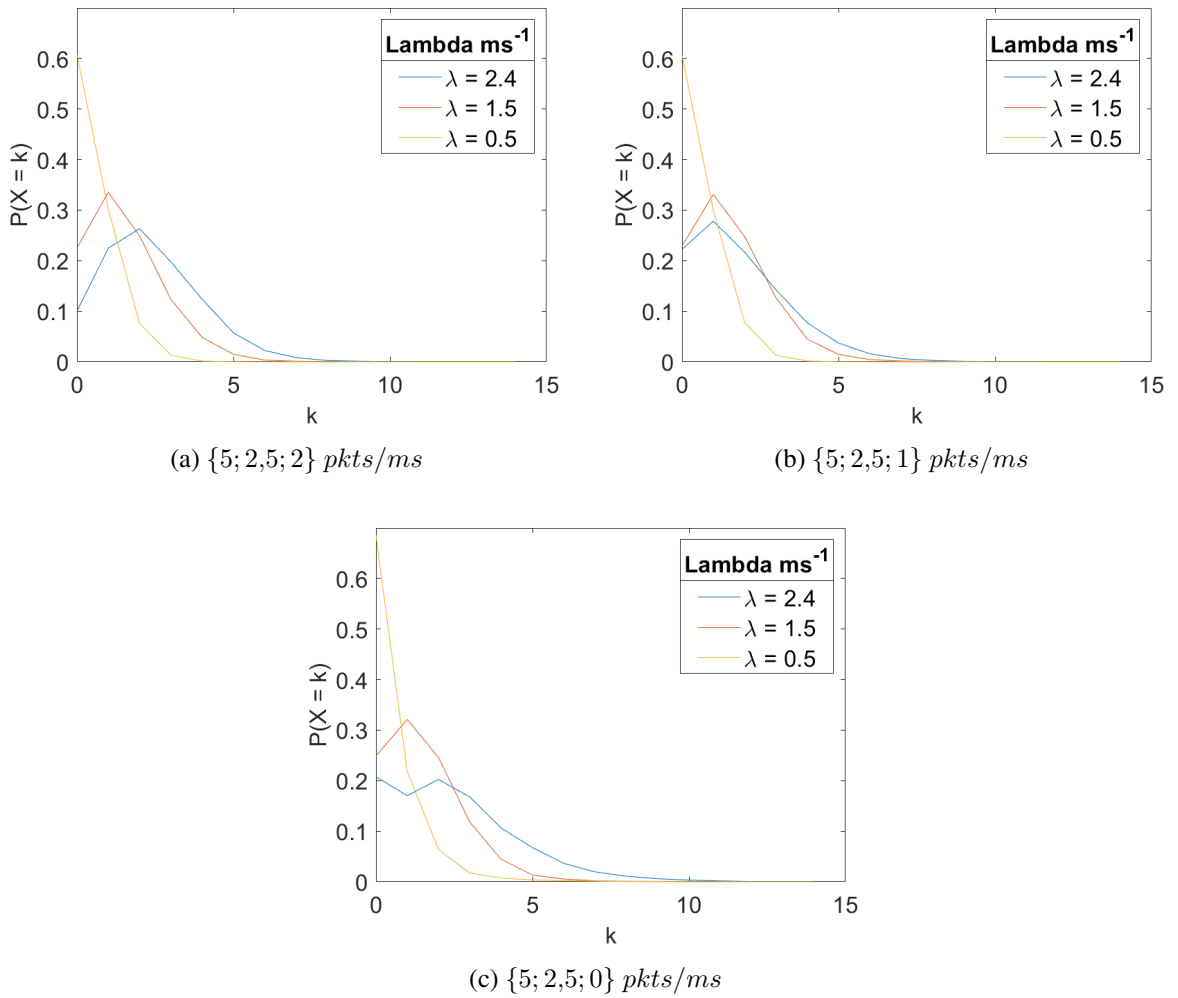


Figura 4.4: Distribución del tráfico en la salida para buffer infinito.

Como se aprecia en la Figura 4.4, el número máximo de eventos que salen del sistema por unidad de tiempo, en el caso representado por 4.4a, coincide con la tasa de entrada. Una vez que se supera el umbral máximo tanto en 4.4b como en 4.4c, la tasa de entrada superior representada por el color azul se ve perjudicada en mayor proporción, esto se achaca a la superación de las condiciones de equilibrio, más un empeoramiento en las condiciones del canal. En el último escenario se puede apreciar cómo las dos tasas más altas se ven afectadas, mientras que la más baja persiste en mejores condiciones. Es decir,

siendo la tasa promedio máxima del sistema $\lambda_{max} = 1,59ms^{-1}$ como se vio en la Tabla 4.4 y la tasa de llegadas representada por el color amarillo substancialmente inferior, se puede decir que está por debajo de las capacidades del canal.

Buffer finito

Seguidamente se presenta la caracterización de la salida del sistema para un tamaño de buffer finito. Se debe considerar que en un nodo ideal en condiciones de buffer finito, la tasa de entrada es igual que la salida. Es por ello, el interés que subyace en saber su comportamiento en el modelo LMS.

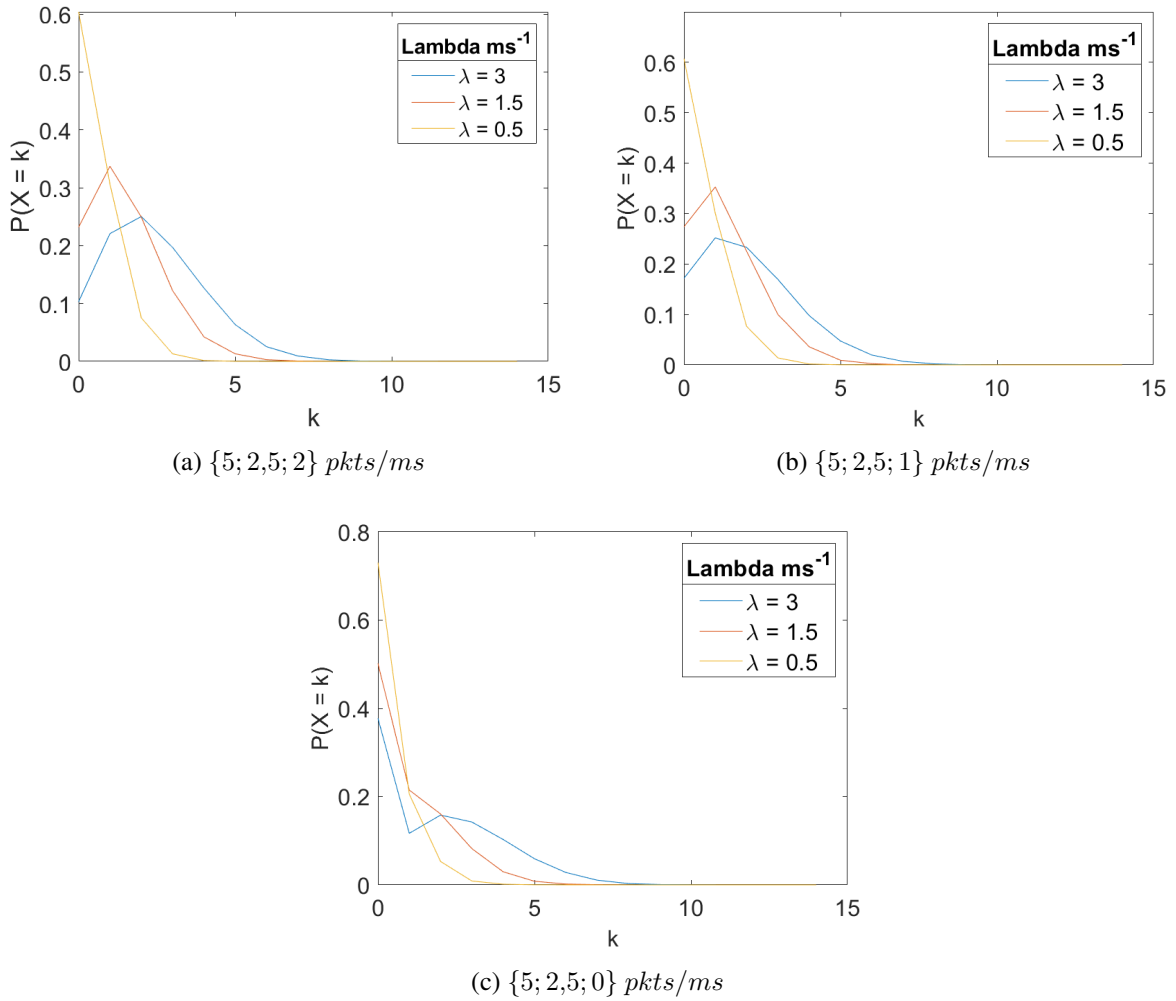


Figura 4.5: Distribución del tráfico en la salida para buffer finito $b = 7$.

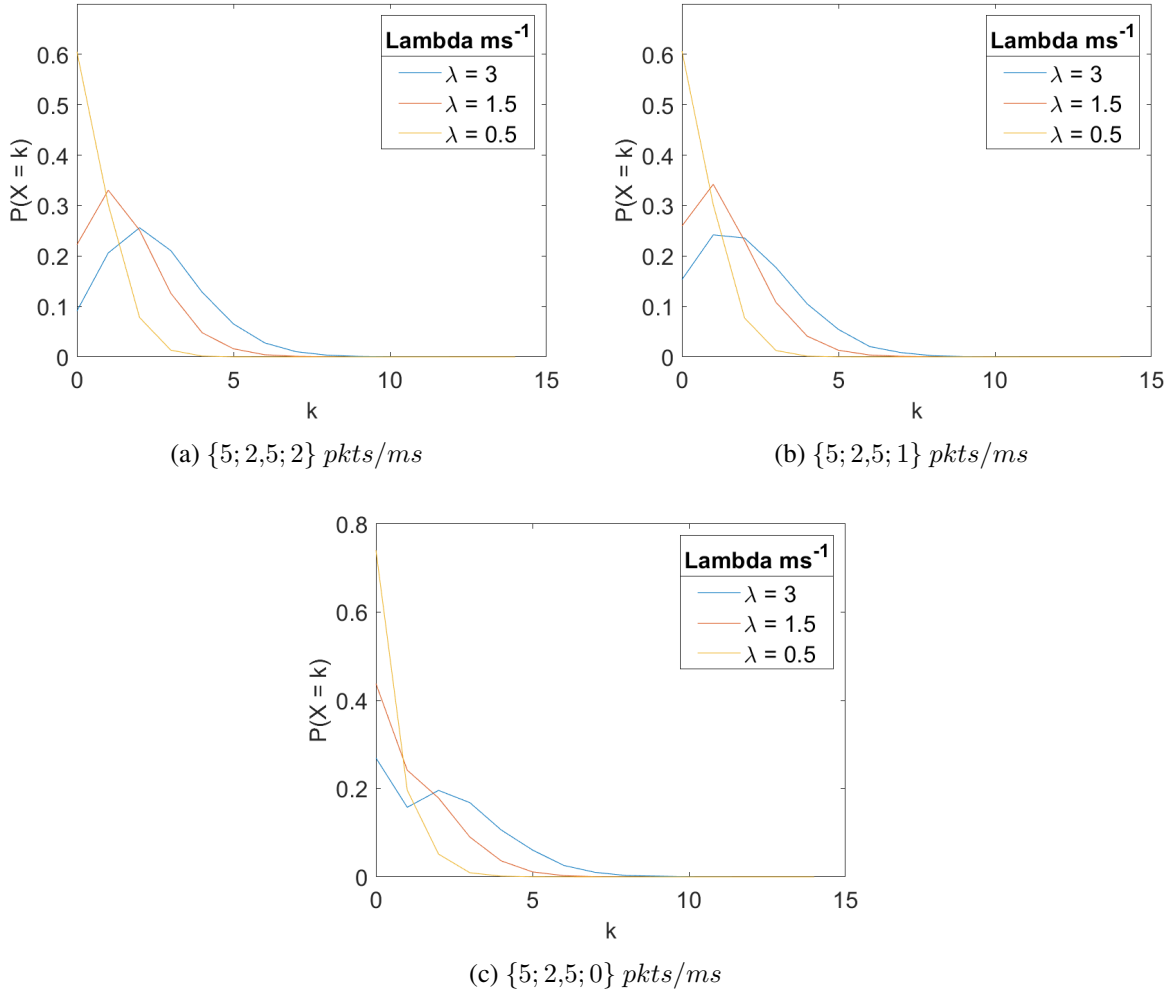


Figura 4.6: Distribución del tráfico en la salida para buffer finito $b = 15$.

Como se puede ver en las Figuras 4.5c y 4.6c, se observa el impacto de las condiciones de desvanecimiento profundo siendo más probable el hecho de que haya cero eventos en la salida del nodo LMS, como consecuencia de tener una tasa de procesamiento nula si se llega a esa condición.

4.1.3. Coeficiente de dispersión

El coeficiente de dispersión, también denominado Relative Standard Deviation RSD, es un parámetro que indica si realmente en la salida sigue un tráfico de Poisson, lo que se da cuando su valor es la unidad. En otras palabras, eso quiere decir que es el tiempo entre salidas consecutivas exponencial negativa, pues se puede afirmar que la media es el inverso de la tasa de llegadas y la varianza el inverso al cuadrado.

Buffer infinito

A continuación se presentan los datos obtenidos del simulador, tras ser analizados para obtener el índice de dispersión en un sistema con espera pura.

En la Figura 4.7, se puede decir que en los dos primeros escenarios, representados por el color azul y rojo, la tasa de salida es igual a la tasa de entrada, aunque hay que denotar una pequeña elevación de

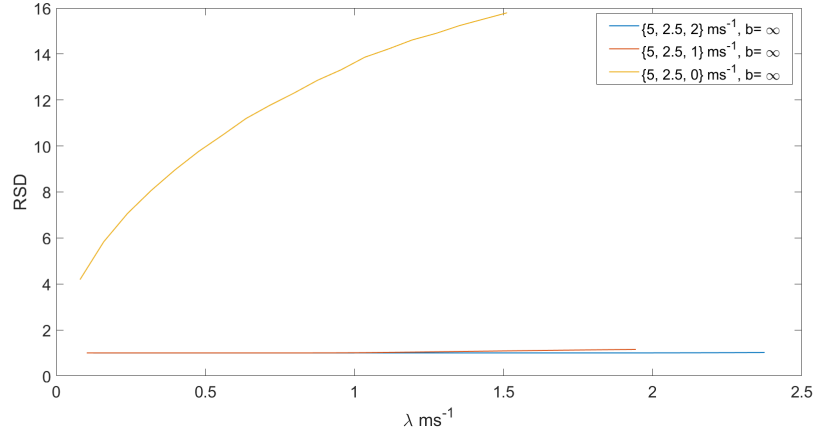


Figura 4.7: Coeficiente de dispersión del tiempo entre salidas sobre $\lambda \text{ ms}^{-1}$.

escenario con tasa $\mu_{ds} = 1 \text{ ms}^{-1}$. Se puede señalar que cuando el buffer es infinito y la tasa $\mu_{ds} = 0 \text{ ms}^{-1}$, en ningún momento se puede garantizar que el proceso de salida es igual al de la entrada.

Buffer finito

A continuación, la Figura 4.8 presenta el coeficiente de dispersión para seis escenarios. Las líneas punteadas representan los escenarios para buffer finito con tamaño 15, mientras que las líneas continuas representan el comportamiento para el caso de tamaño de buffer 7.

Lo primero que se puede destacar es que a mayor tamaño de buffer, se da una subida sustancial frente a un tamaño considerablemente menor. Como se puede observar, en el eje de abscisas se va aumentando la tasa de llegadas.

También se puede notar que una vez que se rebasa la tasa de servicio ofrecida por el estado de *deep shadowing*, no se puede afirmar que la tasa de salidas sea igual a la tasa de entradas del sistema, pues el coeficiente de dispersión presenta un fuerte aumento. Cabe recalcar que cuando $\mu_{ds} = 0 \text{ ms}^{-1}$, el sistema nunca manifiesta comportamiento exponencial negativo.

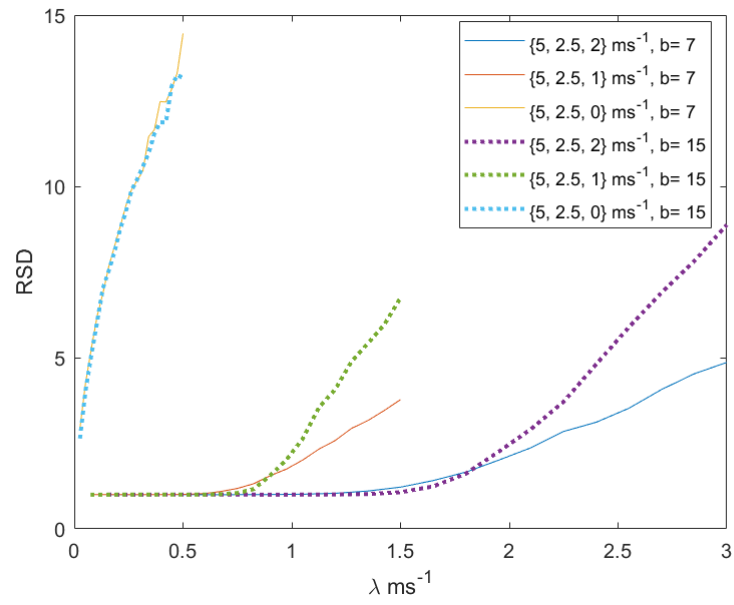


Figura 4.8: Coeficiente de dispersión del tiempo entre salidas frente a la tasa de llegadas $\lambda \text{ ms}^{-1}$ para buffer finito $b = \{7, 15\}$.

4.2. Red conformada por un nodo LMS y nodos M/M/1

Una vez caracterizado el tráfico en la salida del nodo LMS, observamos cómo afecta el hecho de añadir nodos M/M/1 en cadena, emulando la topología de una red LEO.

Como se vio en las secciones previas, las configuraciones con peores prestaciones son aquellas en las cuales la tasa de DS se ve agravada: $\mu_{ds} = \{1, 0\} \text{ ms}^{-1}$. Es por ello que en este punto se acotan los escenarios a estas dos tasas de servicio en condiciones de desvanecimientos profundos, para observar las implicaciones que ello conlleva. Destacar que los enlaces ISLs, que modelan la comunicación entre dos satélites serán representados por nodos M/M/1, cuya tasa viene indicada por $\mu_{ds} = 5 \text{ ms}^{-1}$, como se menciona en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Características de los escenarios para una red satelital.

LMS [ms^{-1}]	ISL [ms^{-1}]	Buffer
{5; 2.5; 1}	5	∞ , 7, 15
{5; 2.5; 0}	5	∞ , 7, 15

4.2.1. Coeficiente de dispersión

En las siguientes gráficas se va a observar el comportamiento del nodo LMS en línea punteada, mientras que en línea continua se va a representar las salidas de los nodos respectivos del sistema. En primer lugar se configura el nodo LMS en su modo ideal, esto es de espera pura. Una vez abordado ese escenario, se utilizará el modo más realista, acotando el buffer del nodo LMS, y se repetirá el mismo proceso.

Buffer infinito

En las Figuras 4.9 y 4.10 la tasa se recorre hasta su valor máximo garantizando la estacionariedad del sistema. Estas son las que se reflejan en la Tabla 4.6

Tabla 4.6: Escenarios implementados hasta la tasa que garantiza la estabilidad del sistema.

LMS [ms^{-1}]	λ_{max} [ms^{-1}]
{5; 2.5; 1}	2.05
{5; 2.5; 0}	1.59

En las siguientes Figuras 4.9 y 4.10, se puede percibir un ascenso del coeficiente de dispersión a medida que nos acercamos a la condición de estabilidad del sistema. Además, podemos ver el impacto ocasionado tras rebasar la tasa de *deep shadowing* del modelo, en tanto en cuanto $\lambda \geq \mu_{ds}$ se manifiesta una mayor variabilidad en el tiempo entre salidas del sistema.

Por añadidura, cabe recalcar la repercusión de que el sistema sufra interrupciones a lo largo del tiempo, representativo de poseer una tasa nula en condiciones de desvanecimiento profundo. En este momento no

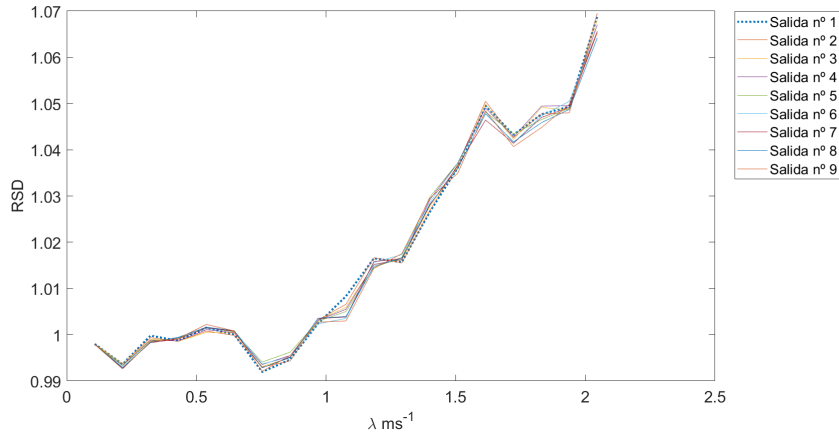


Figura 4.9: Coeficiente de dispersión para buffer infinito y tasa $\mu_{ds} = 1 \text{ ms}^{-1}$.

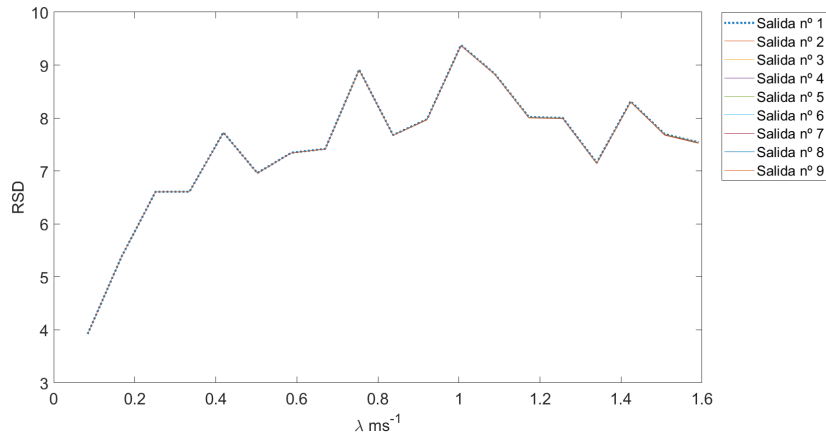


Figura 4.10: Coeficiente de dispersión para buffer infinito y tasa $\mu_{ds} = 0 \text{ ms}^{-1}$.

se puede decir que la tasa de llegadas sea igual que la salida. Así, el tráfico no se puede modelar por una distribución de Poisson, debido a que el tiempo entre salidas posee una gran variabilidad.

Buffer finito

Una vez mostrado el comportamiento para un modelo más teórico, procedemos a añadirle la connotación realista limitando el buffer. Se barre la tasa de llegadas hasta un valor de $\lambda = 3 \text{ ms}^{-1}$, como se puede observar en la Tabla 4.7, donde se muestran los dos escenarios, ambos empleados tanto para buffer 7 como para 15.

Tabla 4.7: Escenarios implementados con la correspondiente tasa máxima para buffer $b = \{7, 15\}$.

LMS [ms^{-1}]	λ [ms^{-1}]
{5; 2.5; 1}	3
{5; 2.5; 0}	3

Como se refleja en el comportamiento del sistema, un aumento de la tasa de llegadas, produce un

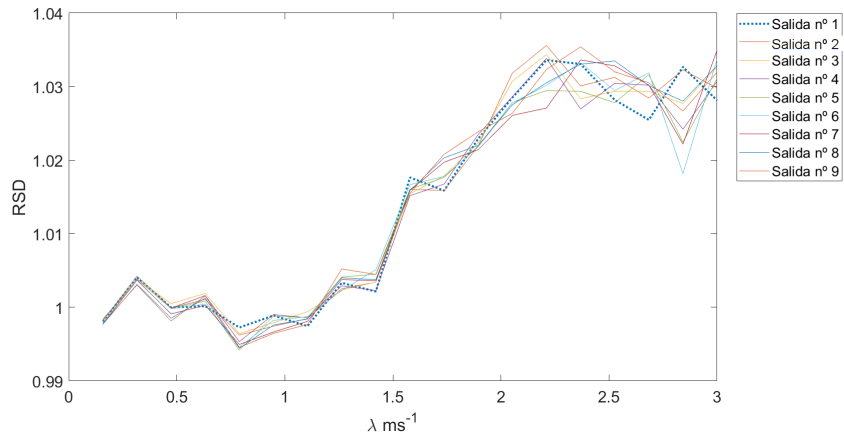


Figura 4.11: Coeficiente de dispersión para buffer finito, $b = 7$ y $\mu_{ds} = 1 \text{ pkts/ms}$.

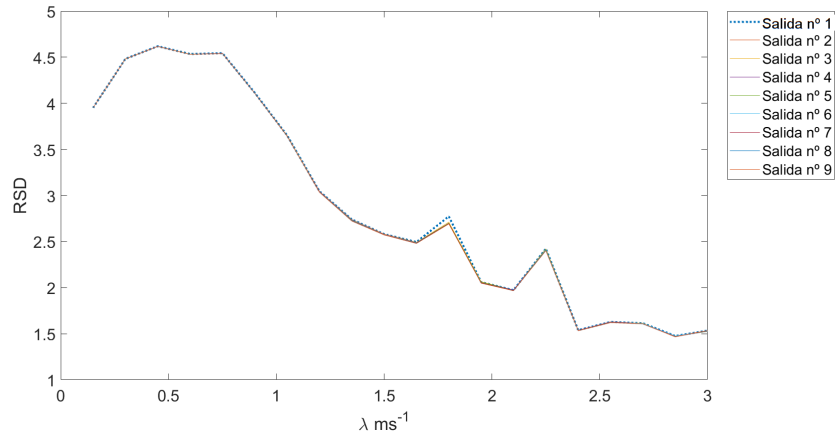


Figura 4.12: Coeficiente de dispersión para buffer finito, $b = 7$ y $\mu_{ds} = 0 \text{ pkts/ms}$.

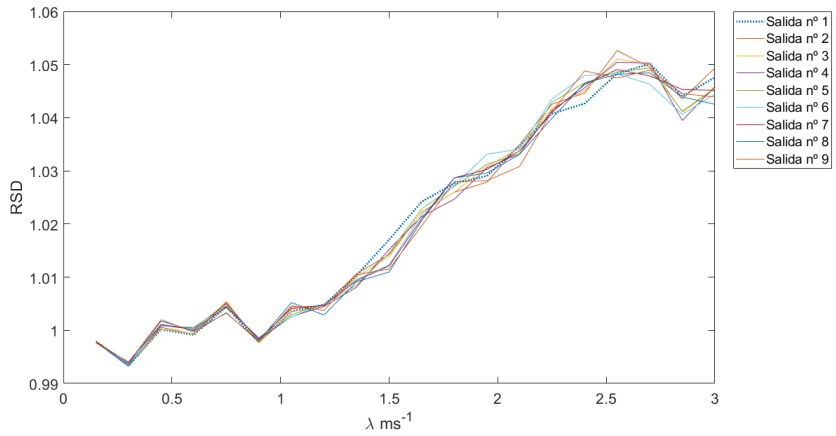


Figura 4.13: Coeficiente de dispersión para buffer finito, $b = 15$ y $\mu_{ds} = 1 \text{ pkts/ms}$.

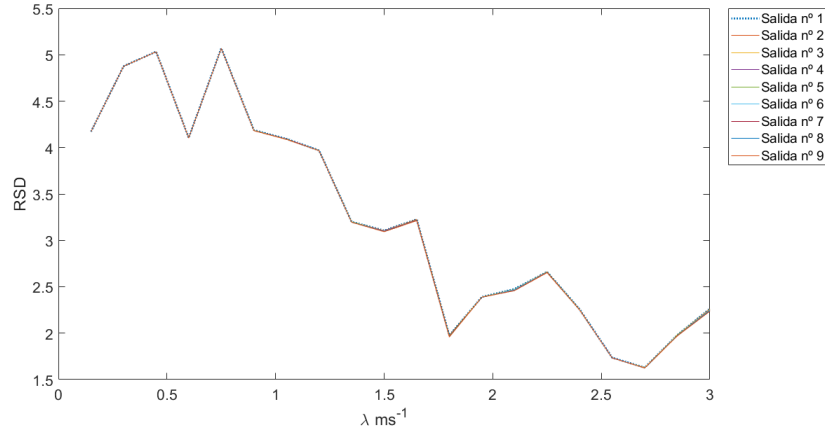


Figura 4.14: Coeficiente de dispersión para buffer finito, $b = 15$ y $\mu_{ds} = 0 \text{ pkts/ms}$.

ligero incremento en el coeficiente de dispersión, una vez que se supera la tasa marcada por condiciones de desvanecimiento profundo $\mu_{ds} = 1 \text{ ms}^{-1}$, Figuras 4.11 y 4.13. Por contra, cuando la tasa cambia a un valor nulo, el coeficiente de dispersión del tiempo entre salidas se eleva, pudiendo afirmar que deja de ser exponencial negativa, descendiendo al aumentar la tasa de llegadas del sistema.

En las Figuras 4.12 y 4.14, se ve una incidencia en la salida, cuando el buffer es finito y la tasa $\mu_{ds} = 0 \text{ ms}^{-1}$. En primera instancia, cuando el buffer es finito y la tasa es baja, varía entre $[0 - 1] \text{ ms}^{-1}$, el buffer no se llena por completo y, por tanto, el tiempo entre salidas se puede decir que es más propenso a variabilidades debido a efectos de interrupciones, una tasa de llegadas extremadamente baja y una capacidad variable.

Por otro lado, cuando se producen paradas en el sistema, es decir la capacidad del procesador se ve interrumpida, y la tasa de llegadas es superior, el buffer tiende con mayor probabilidad a que se llene, descartándose tramas que no pueden ser almacenadas. Una vez en el estado Deep-Shadowing, el canal cambiaría de cambiar al estado Line of Sight o Mid-Shadowing. En este punto de cambio, el tiempo entre salidas, cuando llega a cualquiera de los estados que posibilitan drenar tramas, da lugar a una correlación con la capacidad en la que los paquetes se procesan en ese momento, hasta que el buffer se vacíe.

Finalizando este apartado, hay que recalcar el impacto del empleo de enlaces intersatelitales modelados por una cola de espera pura, se puede afirmar que un nodo M/M/1 presenta un comportamiento estable. Se destaca que la tasa a la salida del sistema LMS se convierte en la tasa de llegadas de un nodo M/M/1. Esta tasa es considerablemente inferior, frente a la tasa de servicio de servicio del sistema M/M/1, puesto que dichos enlaces poseen una tasa correspondiente al estado Line of Sight, $\mu_{los} = 5 \text{ ms}^{-1}$. Por tanto, no tiene efectos negativos aparentes en el tráfico.

Conclusiones y líneas futuras

En este capítulo se cierra la memoria, dando a conocer las conclusiones que se han obtenido tras analizar distintos escenarios sobre una red satelital. En segundo lugar, se expondrán aquellos trabajos que surgen a partir de este.

5.1. Conclusiones

Debido al auge de la tecnologías satélites en las redes inalámbricas y la falta de conocimiento en el estudio del canal tierra-satélite a través de modelos más realistas, se propone la caracterización del tráfico en la salida un nodo que modela el canal LMS, observando el impacto que ello conlleva, como una continuación de trabajos previos [17]. Con este fin, se ha tratado de caracterizar el comportamiento a la salida de un modelo de cola que da forma a los enlaces tierra-satélite en constelaciones Low Earth Orbit LEO. En él se considera dos estaciones terrestres conectadas a través de una cadena de enlaces satelitales. Este trabajo se centra en el primer enlace, y los siguientes, sin llegar a la respectiva estación terrestre final. El primer enlace que simula la conexión de una estación terrestre con el primer satélite se modela como una cadena de Markov bidimensional. Esta cadena se encarga de capturar diferentes estados del canal, desde las mejores condiciones hasta las peores. Por lo contrario, los enlaces entre satélites se modelan mediante colas M/M/1 ideales.

Concretamente, el trabajo se centra en la caracterización del tráfico en situaciones donde la tasa de llegadas para modelos de espera pura, se encuentra entre la tasa de desvanecimientos profundos, es decir Deep-Shadowing DS y la tasa de llegadas es inferior a la tasa de servicio promedio del sistema. Siendo la tasa de llegadas inferior a la tasa de μ_{ds} se puede garantizar que el sistema esté sujeto bajo las premisas de los Teoremas de Burke y Jackson. Seguidamente, se dotó de mayor realismo a la investigación, con el añadido de una limitación en el buffer, apreciando un comportamiento peculiar cuando la tasa de *deepshadowing* es nula.

Los resultados demuestran un gran impacto en el comportamiento del sistema en aquellas situaciones donde se producen interrupciones debidas a malas condiciones en el canal. También se aprecia que cuando se rebasa la tasa de servicio condicionada a estar en el estado de DS, el coeficiente de dispersión del tiempo entre salidas no es uno, por ende, no se puede garantizar que la tasa en la entrada sea idéntica en la salida del sistema. Finalizando en estas últimas condiciones, se puede decir que no se cumplen el

Teorema de Burke, ni las condiciones necesarias en las redes de Jackson abiertas. Tras caracterizar el comportamiento del tráfico, el añadido de nodos M/M/1 a la salida del enlace LMS, se vio que tenía un gran impacto, pues la capacidad de los enlaces era superior.

5.2. Líneas futuras

Como continuación de este trabajo, que se ha centrado específicamente en el estudio de la Banda S, en concreto en una elevación, queda pendiente abordar los escenarios sobre otras frecuencias, como la Banda Ka, con otros tiempos y probabilidades característicos del sistema.

Además, en paralelo, se propone añadir un nodo intermedio con desconexiones, con el fin de observar el impacto que ello conlleva en la cola. Emulando de esta manera la comunicación entre dos satélites, cuando se ve afectado por los cambios que se producen en una constelación LEO. En estos cambios, se puede decir que la conexión entre un par de satélites se desvincula y, por ello, lo podemos interpretar como una interrupción. Con el fin de emular un comportamiento similar, se propondrá una cadena de Markov con dos estados. Cada uno de ellos poseerá una tasa, siendo nula, la correspondiente a la situación de desconexión.

Bibliografía

- [1] C. Canales-Valenzuela, M. Baltatu, L. Costa, K. Habel, V. Jungnickel, G. Koczian, F. Ngobigha, M. Parker, M. S. Siddiqui, E. Trouva y S. Walker. “Security”. En: 2018, págs. 207-225. DOI: 10.1002/9781119425144.ch9.
- [2] GSMA. “The Mobile Economy 2021”. En: (2021), págs. 1-65. DOI: https://www.gsma.com/mobileeconomy/wp-content/uploads/2021/07/GSMA_MobileEconomy2021_3.pdf.
- [3] F. Rinaldi, H.-L. Maattanen, J. Torsner, S. Pizzi, S. Andreev, A. Iera, Y. Koucheryavy y G. Araniti. “Non-Terrestrial Networks in 5G and Beyond: A Survey”. En: *IEEE Access* 8 (2020), págs. 165178-165200. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3022981.
- [4] A. Chen, C.-T. Chang e Y.-D. Yao. “Performance evaluation of ARQ operations with OBP and inter-satellite links: delay performance”. En: *IEEE 54th Vehicular Technology Conference. VTC Fall 2001. Proceedings (Cat. No.01CH37211)*. Vol. 4. 2001, 2346-2350 vol.4. DOI: 10.1109/VTC.2001.957168.
- [5] “Un análisis de retardo promedio de paquetes de extremo a extremo para redes de satélites LEO”. En: *Proceedings IEEE 56th Vehicular Technology Conference*. DOI: 10.1109/VETECF.2002.1040571.
- [6] R. Hermenier, C. Kissling y A. Donner. “A delay model for satellite constellation networks with inter-satellite links”. En: *2009 International Workshop on Satellite and Space Communications*. 2009, págs. 3-7. DOI: 10.1109/IWSSC.2009.5286440.
- [7] L. Tan, Y. Liu y J. Ma. “Analysis of queuing delay in optical space network on LEO satellite constellations”. En: *Optik* 125.3 (2014), págs. 1154-1157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2013.07.119>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003040261301125X>.
- [8] T. Li, H. Zhou, H. Luo, W. Quan y S. Yu. “Modeling software defined satellite networks using queueing theory”. En: *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. 2017, págs. 1-6. DOI: 10.1109/ICC.2017.7997290.
- [9] Y. Zhu, L. Qian, L. Ding, F. Yang, C. Zhi y T. Song. “Software defined routing algorithm in LEO satellite networks”. En: *2017 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICELTICS)*. 2017, págs. 257-262. DOI: 10.1109/ICELTICS.2017.8253282.

- [10] Y. Zhu, M. Sheng, J. Li y R. Liu. "Performance Analysis of Intermittent Satellite Links With Time-Limited Queuing Model". En: *IEEE Communications Letters* 22.11 (2018), págs. 2282-2285. DOI: 10.1109/LCOMM.2018.2866570.
- [11] U. Speidel y L. Qian. "Striking a Balance between Bufferbloat and TCP Queue Oscillation in Satellite Input Buffers". En: *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. 2018, págs. 1-6. DOI: 10.1109/GLOCOM.2018.8647662.
- [12] H. Li, H. Zhang, L. Qiao, F. Tang, W. Xu, L. Chen y J. Li. "Queue State Based Dynamical Routing for Non-geostationary Satellite Networks". En: *2018 IEEE 32nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)*. 2018, págs. 1-8. DOI: 10.1109/AINA.2018.00014.
- [13] Y. Nie, Z. Fang y S. Gao. "Survivability Analysis of LEO Satellite Networks Based on Network Utility". En: *IEEE Access* 7 (2019), págs. 123182-123194. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2936637.
- [14] B. Soret, S. Ravikanti y P. Popovski. "Latency and timeliness in multi-hop satellite networks". En: *ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. 2020, págs. 1-6. DOI: 10.1109/ICC40277.2020.9149009.
- [15] B. Soret, I. Leyva-Mayorga, S. Cioni y P. Popovski. "5G satellite networks for Internet of Things: Offloading and backhauling". En: *International Journal of Satellite Communications and Networking* 39.4 (2021), págs. 431-444. DOI: <https://doi.org/10.1002/sat.1394>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/sat.1394>.
- [16] F. Chiariotti, O. G. Vikhrova, B. Soret y P. Popovski. "Information Freshness of Updates Sent over LEO Satellite Multi-Hop Networks". En: *CoRR* abs/2007.05449 (2020). URL: <https://arxiv.org/abs/2007.05449>.
- [17] N. J. H. Marcano, L. Diez, R. A. Calvo y R. H. Jacobsen. "On the Queuing Delay of Time-Varying Channels in Low Earth Orbit Satellite Constellations". En: *IEEE Access* 9 (2021), págs. 87378-87390. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3089005.
- [18] J. A. Morano Fernández. "Análisis y ejemplos de órbitas circulares". En: *Annalen der Physik* 10 (), págs. 1-9. DOI: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/132655/Mora%C3%B1o%20-%20An%C3%A1lisis%20y%20ejemplos%20de%20%C3%B3rbitas%20circulares.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [19] G. Green. *Non Terrestrial Networks and 5G*. 2020. URL: <https://www.mpirical.com/blog/non-terrestrial-networks-and-5g>. (Visitado por ultima vez el: 23.08.2021).
- [20] Stephan Jaeckel, Leszek Raschkowski (FhG-HHI), Junhyeong Kim, Gosan Noh (ETRI), Marjorie Thary, Jean-Michel Houssin (TAS), Ji-In Kim (KTSat), Nicolas Cassiau (CEA). "Spectrum usage analysis and channel model". En: *Annalen der Physik* D3.1.H2020-EUK-815323/5G-ALLSTAR/D3.1 (2019), págs. 1-82. DOI: https://5g-allstar.eu/wp-content/uploads/2019/07/815323_Deliverable_3.1_Spectrum-usage-analysis-and-channel-model.pdf.
- [21] E. RF. *Microwave Frequency Bands*. 2019. URL: <https://www.everythingrf.com/tech-resources/frequency-bands>. (Visitado por ultima vez el: 25.08.2021).

- [22] X. Lin, S. Rommer, S. Euler, E. A. Yavuz y R. S. Karlsson. “5G from Space: An Overview of 3GPP Non-Terrestrial Networks”. En: *CoRR* abs/2103.09156 (2021). URL: <https://arxiv.org/abs/2103.09156>.
- [23] Y. Qi. *Non-terrestrial Networks: Standardization in 5G NR*. 2019. URL: https://www.cambridgewireless.co.uk/media/uploads/files/CWTEC19-Yinan_Qi-Samsung.pdf. (Visitado por ultima vez el: 19.08.2021).
- [24] X. Lin, S. Rommer, S. Euler, E. A. Yavuz y R. S. Karlsson. *5G from Space: An Overview of 3GPP Non-Terrestrial Networks*. 2021.
- [25] F. Fontan, M. Vazquez-Castro, C. Cabado, J. Garcia y E. Kubista. “Statistical modeling of the LMS channel”. En: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 50.6 (2001), págs. 1549-1567. DOI: 10.1109/25.966585.
- [26] L. M. G. Ramón Agüero Calvo. *Teletráfico. Dimensionado de Sistemas*. URL: <https://www.tlmat.unican.es/siteadmin/submaterials/3406.pdf>. (Visitado por ultima vez el: 28.08.2021).
- [27] M. Zukerman. “Introduction to Queueing Theory and Stochastic Teletraffic Model”. En: (2000-2020), págs. 1-298. DOI: <https://arxiv.org/pdf/1307.2968.pdf>.
- [28] R. A. Calvo. *Redes de Sistemas de Cola*. 2021. URL: <https://www.tlmat.unican.es/siteadmin/submaterials/3356.pdf>. (Visitado por ultima vez el: 17.08.2021).
- [29] J. A. H. G. Pablo Serrano Yáñez-Mingot. *Una introducción amable a la teoría de colas*. URL: <https://www.it.uc3m.es/pablo/teoria-colas/introduccion-teoria-colas.pdf>. (Visitado por ultima vez el: 28.08.2021).
- [30] E. International. *ECMA-404 El estándar de intercambio de datos JSON*. 2017. URL: <https://www.ecma-international.org/publications-and-standards/standards/ecma-404/>. (Visitado por ultima vez el: 19.08.2021).
- [31] J. org. *ECMA-404 El estándar de intercambio de datos JSON*. 2017. URL: <https://www.json.org/json-en.html>. (Visitado por ultima vez el: 19.08.2021).
- [32] L. P. Ramos. *Cómo ejecutar sus scripts de Python*. 2012-2020. URL: <https://realpython.com/run-python-scripts/>. (Visitado por ultima vez el: 19.08.2021).
- [33] MathWorks. *¿Qué es MATLAB?*. 1994-2021. URL: <https://es.mathworks.com/discovery/what-is-matlab.html>. (Visitado por ultima vez el: 19.08.2021).